

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

**Departamento de Arquitectura de Computadores y
Automática**



TESIS DOCTORAL

**Agentes de control de vehículos autónomos en entornos
urbanos y autovías**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

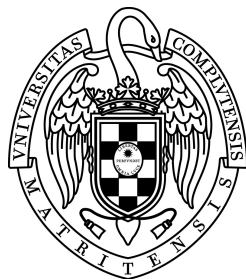
PRESENTADA POR

Joshué Manuel Pérez Rastelli

Directoras

**Teresa de Pedro Lucio
Matilde Santos Peñas**

Madrid, 2012



Agentes de control de vehículos autónomos en entornos urbanos y autovías

TESIS DOCTORAL

Joshué Manuel Pérez Rastelli

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática

Facultad de Físicas

Universidad Complutense de Madrid

Enero 2012

Agentes de control de vehículos autónomos en entornos urbanos y autovías

TESIS DOCTORAL

Realizada por el ingeniero:
Joshué Manuel Pérez Rastelli

Bajo la dirección de las Doctoras:
Teresa de Pedro Lucio y
Matilde Santos Peñas

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática
Facultad de Físicas
Universidad Complutense de Madrid

Enero 2012

Copyright © Joshué Manuel Pérez Rastelli

Resumen

Las investigaciones realizadas en los últimos años en el campo de los sistemas de transporte inteligente (ITS) en sistemas de asistencia a la conducción (ADAS), infraestructuras inteligentes y conducción autónoma de vehículos han impulsado de manera decisiva la implantación de sistemas inteligentes en el transporte por carretera. Gracias a las investigaciones realizadas por diversos grupos y proyectos a nivel mundial, así como al desarrollo tecnológico de los últimos años, es posible encontrar en la actualidad vehículos más seguros y confortables. Son muchas las aplicaciones que se han implementado en vehículos comerciales. Cabe citar los sistemas de antibloqueo de frenos (ABS), control de crucero (CC), ayudas para el aparcamiento o el control de estabilidad (ESC), entre otras. No es utópico pensar que en un futuro cercano los vehículos autónomos estarán conviviendo con los vehículos convencionales, comunicándose e interactuando entre ellos.

En esta tesis se presenta el desarrollo de diferentes sistemas de control para vehículos autónomos que permiten gestionar maniobras individuales y cooperativas en diferentes escenarios urbanos y en autovías. Primero se describen las contribuciones hechas en el control lateral y longitudinal, utilizando tanto técnicas de control clásico como técnicas de inteligencia artificial, fundamentalmente control borroso y neuro-borroso. En una segunda parte del trabajo se describen una serie de experimentos que validan los sistemas de control propuestos.

Por ese motivo se han considerado las diferentes plataformas de pruebas con las que cuenta el programa AUTOPÍA. Conjuntamente, estudios realizados en el estado de la técnica, así como el manejo de entornos virtuales, han permitido validar los resultados presentados en esta tesis. Los cuales, en su totalidad han sido probados en vehículos reales en pista de pruebas dedicadas, así como en carreteras reales.

Esta arquitectura de control para vehículos autónomos busca ser independiente de los vehículos y de los escenarios utilizados. En este sentido se han utilizado vehículos eléctricos e impulsados a gasolina para entornos urbanos, esto es: segmentos rectos y curvos, calles con doble sentido, rotondas, salidas de calles bloqueadas y comunicaciones con la infraestructura y entre vehículos. Por otra parte, se presentan experimentos a mayor velocidad, usando vehículos de propulsión a gasolina, donde se han ajustado los controladores borrosos que primero fueron probados a bajas velocidades. Gracias a estas aportaciones, el equipo AUTOPÍA ha podido participar en la primera competición de vehículos autónomos a nivel europeo: el GCDC 2011.

Entre las principales contribuciones de esta tesis destaca el sistema de control lateral en cascada para vehículos autónomos, el cual permite trasladar de forma más eficiente el conocimiento humano a la conducción en entornos urbanos. Además, este sistema de control es de fácil sintonía, siendo extrapolable a todo tipo de maniobras, como la marcha atrás y las rotondas. Por otro lado, el control longitudinal neuro-borroso permite mejorar los resultados obtenidos utilizando controladores clásicos y borrosos, gracias a la introducción de nuevas variables de control y el conocimiento de conductores expertos.

Abstract

In the last years, mass-produced vehicle implementations have been done in the field of intelligent Transportation System (ITS). The Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), intelligent infrastructures and autonomous driving maneuvers have significantly contributed to the implementation of intelligent systems on the road and in urban areas. Thanks to research done by many groups and projects around the world, as well as the development of new technologies, it is possible to find safer and more comfortable vehicles. Some examples of these implementations are: Antilock Brake System (ABS), Cruise control (CC), Automatic parking and Electronic Stability Control (ESC), among others. At this time, it is not a utopia to think that, in a close future, autonomous vehicle will coexist with other conventional vehicles, interacting with them.

In this thesis, different control systems for autonomous vehicles have been developed, both individual and cooperative maneuvers in different urban and highway scenarios. First contributions are in the lateral and longitudinal control, using both classical and artificial intelligent techniques, basically fuzzy and neuro-fuzzy controllers. In the second part of this work, different experiments that validate the proposed control system have been described.

To realize these experiments, the different platforms of the AUTOPIA program have been used. In the same way, studies on the state of the art, as well as management of virtual environments have allowed to validate the results presented in this thesis. All the experiments, in their entirety have been tested in real vehicles, both dedicated test tracks and real roads.

This control architecture for autonomous vehicles is independent of the vehicle and the scenario used. Electric and gasoline-propelled vehicles for urban environment, that is: straight and curve segments, two-way streets, roundabouts, blocked roads and communications between infrastructure and vehicles have been used. Moreover, high speed experiments, using gasoline-propelled vehicles, have been presented. Thanks to these contributions, AUTOPIA team has participated in the first autonomous vehicle competition at European level: GCDC 2011.

The main contribution of this thesis is the cascade lateral control system for autonomous vehicles, which allows to transfer more efficiently the human knowledge for driving in urban environments. Furthermore, this control system is easy to tune, and it has been extended to different of maneuvers, such as reverse driving and roundabouts. On the other hand, the neuro-fuzzy longitudinal control system improves the results obtained with classical and fuzzy control, based on the experienced drivers and other new control variables.

Índice

Resumen	v
Abstract	vii
1 Introducción	1
1.1 Propósito	2
1.1.1 Objetivos	3
1.2 Estructura del trabajo	3
1.3 Aportaciones	4
1.4 Difusión de los resultados	6
En el próximo capítulo	8
2 Estado del arte	9
2.1 Los Sistemas inteligentes de transporte	9
2.1.1 Alcance de la tesis	10
2.1.2 Situación actual	12
2.2 Grupos de Investigación	14
2.2.1 INSIA	14
2.2.2 IMARA	14
2.2.3 Centro de Investigación FIAT	15
2.2.4 Robesafe -Universidad de Alcalá-	16
2.2.5 VisLab -Universidad de Parma-	16
2.2.6 Universidad de Griffith	17
2.2.7 PATH	17
2.3 Proyectos Europeos de Investigación	18
2.3.0.1 COOPERS	18
2.3.0.2 CyberCars	18
2.3.0.3 Iniciativa e-Safety	19
2.3.0.4 Consorcio Car2Car	20
2.4 Programa AUTOPÍA	20
2.4.1 La flota de vehículos	24
2.4.2 ORBEX	25
2.4.3 Arquitectura para vehículos autónomos	27
3 Control lateral en cascada para vehículos autónomos	29
3.1 Introducción	29
3.2 Planteamiento del problema	29
3.3 Ámbito y trabajos previos	30
3.4 Descripción del sistema	33
3.4.1 Mejoras en el hardware del control lateral	34

3.4.2	Mejoras en el hardware del control longitudinal	36
3.5	Control en cascada	37
3.5.1	Lazo interno de control	38
3.5.1.1	Identificación del sistema	39
3.5.1.2	Estimación de las ganancias del PID	39
3.5.1.3	Parámetros para el perfil de velocidad	40
3.5.2	Lazo externo de control	42
3.5.2.1	Variables de entrada y funciones de pertenencia	42
3.5.2.2	Reglas borrosas	43
3.5.2.3	Variables de salida	45
3.6	Experimentos y resultados	45
3.6.1	Validación del bajo nivel	46
3.6.2	Experimentos con curvas de entornos urbanos	47
3.6.3	Experimentos con diferentes curvas y velocidades	48
	En el próximo capítulo	52
4	Control longitudinal neuro-borroso para vehículos autónomos	53
4.1	Introducción	53
4.2	Planteamiento del problema	53
4.3	Trabajos previos	54
4.4	Plataforma de pruebas	55
4.5	Control longitudinal con salida incremental	56
4.5.1	Controlador borroso	57
4.5.2	Controlador neuro-borroso	58
4.6	Comparación controladores a baja velocidad	62
4.6.1	Controlador PI	63
4.6.2	Controlador i-PI	63
4.6.3	Controlador borroso con salida absoluta	64
4.6.4	Controlador neuro-borroso con salida absoluta	65
5	Resultados experimentales	71
5.1	Introducción	71
5.2	Adelantamiento con tres vehículos	72
5.2.1	Trabajos previos	72
5.2.2	Vehículos utilizados y escenario de pruebas	74
5.2.3	Maniobra de Adelantamiento	76
5.2.3.1	Maniobra de adelantamiento con tres vehículos	77
5.2.4	Controlador borroso para el adelantamiento	79
5.2.4.1	Controlador para el cambio de carril	79
5.2.4.2	Controlador borroso para abortar el adelantamiento (CBAA)	80
5.2.4.3	Diagrama de estados para la maniobra de adelantamiento	82
5.2.5	Experimentos	83
5.2.5.1	Adelantamiento sin tráfico en sentido opuesto	83
5.2.5.2	Abortar el adelantamiento en fase 1 (disminuyendo la velocidad)	83
5.2.5.3	Abortar el adelantamiento en fase 2.2 (aumentando la velocidad)	86
5.3	Control de cruce utilizando RFIDs	86
5.3.1	Trabajos previos	86
5.3.2	Plataforma y escenario de pruebas	88

5.3.2.1	Entorno de pruebas	89
5.3.2.2	Identificadores por radio frecuencia (RFID)	89
5.3.3	Arquitectura para el control crucero basada en RFIDs	92
5.3.4	Resultados experimentales del control crucero basado en RFIDs	93
5.3.4.1	Pruebas utilizando RFIDs	93
5.3.4.2	Sistema autónomo	95
5.4	Movimiento en marcha atrás	97
5.4.1	Trabajos previos	97
5.4.2	Escenario y modificaciones hechas al vehículo de pruebas	98
5.4.3	Controlador para la marcha atrás	99
5.4.3.1	Diagrama de estados para el movimiento en marcha atrás	100
5.4.4	Experimentos	101
5.4.4.1	Seguimiento de trayectorias en marcha atrás	101
5.4.4.2	Experimento utilizando ambos controladores	102
5.5	Conducción en rotondas	105
5.5.1	Planteamiento del problema	105
5.5.2	Condiciones y control en rotondas	106
5.5.3	Esquema de control	107
5.5.3.1	Etapas de percepción	108
5.5.3.2	Etapas de control	110
5.5.4	Resultados experimentales en entornos simulados	110
5.5.4.1	Seguimiento de trayectoria y cambio de carril	110
5.5.4.2	Generación del mapa, giros y cambios de carril dentro de la rotonda	111
5.5.4.3	Simulaciones finales	112
5.5.5	Pruebas en entornos reales	113
5.5.5.1	Escenario de pruebas	114
5.5.6	Control para el volante en la rotonda	114
5.5.6.1	Entrada a la rotonda	114
5.5.6.2	Circulando en la rotonda	115
5.5.7	Resultados experimentales en vehículos reales	118
5.5.7.1	Cambios de carril dentro de la rotonda	119
5.5.7.2	Diferentes velocidades	120
5.5.7.3	Pruebas tomando las salidas 2 y 3	123
5.6	Conducción a altas velocidades	123
5.6.1	Trabajos previos	123
5.6.2	Plataforma y escenario de pruebas	124
5.6.3	Sistema de control	125
5.6.3.1	Cartografía digital	125
5.6.3.2	Sistema de posicionamiento	127
5.6.3.3	Controlador lateral para alta velocidad	127
5.6.4	Experimentos	128
5.6.4.1	Seguimiento del líder	128
5.6.4.2	Cambios de carril	130
5.7	Participación en el GCDC 2011	131
5.7.1	El reto de participar en el GCDC 2011	131
5.7.1.1	Equipos participantes	133
5.7.2	Modificaciones realizadas a <i>Platero</i> para el GCDC	136
5.7.2.1	Requisitos del GCDC	137

5.7.3	Implementación de comunicaciones inalámbricas	138
5.7.3.1	Las comunicaciones en el GCDC	139
5.7.4	Arquitectura de control en el GCDC	140
5.7.4.1	Controlador CC para altas velocidades	142
5.7.4.2	Controlador CACC para altas velocidades	142
5.7.5	Experimentos	143
5.7.5.1	Pruebas previas al GCDC	145
5.7.5.2	Pruebas de clasificación en el GCDC	148
5.7.6	Limitaciones, dificultades encontradas y lecciones aprendidas	152
5.7.6.1	Problemas al recibir un gran volumen de datos	154
5.7.6.2	Problemas de posicionamiento bajo los puentes	154
5.7.6.3	Problemas en la lectura de datos del CAN del vehículo	154
5.7.6.4	Problemas de comunicación con los periféricos	154
6	Conclusiones y trabajos futuros	157
	Bibliografía	165

Índice de figuras

1.1	Aportaciones de la tesis dentro del programa AUTOPIA	5
2.1	Aportaciones dentro del campo de los Sistemas Inteligentes de Transporte .	11
2.2	Diferentes propuestas para las comunicaciones en los ITS	13
2.3	Vehículos del grupo IMARA, del INRIA en París-Rocquencourt, Francia .	15
2.4	Vehículo del programa FIAT Autonomy	16
2.5	Proyecto VIAC, en el recorrido internacional desde Parma a Shangai	17
2.6	Caravana de vehículo del PATH	18
2.7	Diferentes tipos de Cybercars	19
2.8	ZOCO, en las instalaciones del CAR, UPM-CSIC	21
2.9	PC industrial embarcado en <i>Rocinante</i>	22
2.10	Exhibición final del proyecto Cybercas II, en la Rochelle	23
2.11	Vehículos del programa AUTOPIA: <i>Rocinante</i> , <i>Babieca</i> , <i>Platero</i> , <i>Clavileño</i> , y <i>Molinero</i>	24
2.12	Esquema de funcionamiento de un controlador borroso	25
2.13	Arquitectura de control del programa Autopia	27
3.1	Esquema de control de la furgoneta <i>Babieca</i>	34
3.2	Motor, relación de engranajes y controlador	35
3.3	Sensor de efecto Hall y rueda dentada instalados en la rueda delantera de <i>Babieca</i>	36
3.4	Arquitectura para el control lateral en vehículos autónomos	37
3.5	Sistema de potencia para el control del bajo nivel del volante	38
3.6	Identificación del sistema en lazo abierto	39
3.7	Simulación del sistema con Simulink	40
3.8	Trayectorias LSPB en el lazo interno de control. Perfil de velocidad en un ciclo de control (1 A-B). Perfil de velocidad en varios ciclos de control (2 A-B)	41
3.9	Variables de entrada del controlador borroso	43
3.10	Funciones de pertenencia para el control del volante	44
3.11	Salidas singleton del controlador borroso, para posición y velocidad	45
3.12	Superficies de control	45
3.13	Salida del controlador PID a diferentes aceleraciones	46
3.14	Respuesta del volante a un impulso de 180 grados, a diferentes perfiles de velocidades	47
3.15	Recorrido autónomo en entorno urbano a 12 km/h	48
3.16	Recorrido que incluye curvas de diferentes ángulos y velocidades.	49
3.17	Variables de salida del controlador borroso: posición del volante, antes y des- pués, por la acción de control de bajo nivel (izquierda) y velocidad angular (derecha) del volante a diferentes velocidades: 8, 12, 16, 20, y 24 km/h. . . .	51

3.18	Variables de entrada utilizadas para controlar la velocidad angular del volante: Distancia a la curva y velocidad real (a 16 km/h).	52
4.1	<i>Clavileño</i> con los dispositivos y actuadores embarcados	56
4.2	Estructura del control longitudinal con función incremental	56
4.3	Experimento en las instalaciones del CAR con el controlador borroso de (Onieva, 2011)	57
4.4	Arquitectura del sistema ANFIS para el control longitudinal	58
4.5	Experimentos con conductores expertos	59
4.6	Funciones de pertenencia y de salida del controlador neuro-borroso comparadas con el controlador borroso desarrollado en (Onieva, 2011)	60
4.7	Experimento en las instalaciones del CAR con el controlador neuro-borroso generado	61
4.8	Comportamiento del vehículo con un conductor humano	62
4.9	Funciones de pertenencia del controlador borroso con salida absoluta	65
4.10	Funciones de pertenencia del controlador neuro-borroso con salida absoluta	66
4.11	Simulación de los cuatro controladores longitudinales	68
4.12	Experimentos reales con los cuatro controladores embarcados en el vehículo	69
5.1	Arquitectura de control de <i>Rocinante</i>	74
5.2	Pistas de pruebas en el CAR. Longitud máxima de 220 metros	75
5.3	Comunicación entre vehículos y corrección diferencial	75
5.4	Fases del Adelantamiento	76
5.5	Posición inicial y final de vehículos en fase 3 del adelantamiento	77
5.6	Ajuste de minimos cuadrados para la distancia en el cambio de carril en función de la velocidad de <i>VH1</i>	78
5.7	Funciones de pertenencia de entrada del Controlador CBAA	80
5.8	Variables de entrada del controlador CBAA	81
5.9	Diagrama de estados con todos los modos de conducción. Esquema para la maniobra de abortar adelantamiento	82
5.10	Velocidades y fases del adelantamiento entre dos vehículos	83
5.11	Abortando adelantamiento en fase 1	84
5.12	Velocidades de los tres vehículos en la fase 1	84
5.13	Tiempos seguridad (T_S) y recorte (T_R) en la fase 1	84
5.14	Abortando adelantamiento en fase 2.2	85
5.15	Velocidades de los tres vehículos en la fase 2.2	85
5.16	Sensores instalados en el vehículo y la infraestructura para los experimentos con RFIDs	88
5.17	Posiciones de señales de tráfico para el control de cruce inteligente con RFIDs en las instalaciones del CAR	89
5.18	Disposición de las etiquetas y lectores RFID en las señales de tráfico y la furgoneta	91
5.19	Intensidad de las señales colocadas en el frente y reverso de la señal de tráfico, el receptor se encuentra a 1,5 metros sobre el suelo y a 10 metros de distancia	91
5.20	Diagrama operacional del subsistema de comunicaciones, basado en RFID	92
5.21	Esquema de control a bordo del vehículo y la interacción con la infraestructura	93
5.22	Lectura de las etiquetas RFID desde la parte frontal (azul) y trasera (roja) de las señales de tráfico a diferentes velocidades longitudinales del vehículo	94

5.23	Distribución estadística de las lecturas de la intensidad de las señales de tráfico (RSSI) en función de la distancia, para etiquetas frontales (azules) y traseras (rojas). Y un modelo con las perdidas por trayectoria que mejor se adapta a la pérdida de potencia de la señal, ecuación 5.12	95
5.24	Recorrido utilizado para el control longitudinal del vehículo, con los posiciones de las señales de límite de velocidad junto a la carretera	95
5.25	(a) Detección de las señales RFID en función del tiempo del recorrido; (b) Cambios en la velocidad de referencia (verde) y la velocidad real (azul) del vehículo de acuerdo con la información de cada señal	96
5.26	Recorrido establecido para la salida de calles bloqueadas en la pista de pruebas del CAR	99
5.27	Vehículo utilizado en el movimiento en marcha atrás	100
5.28	Funciones de pertenencia para el volante en la marcha atrás	100
5.29	Diagrama de estados para la conducción hacia adelante y en marcha atrás	101
5.30	Seguimiento de trayectorias en marcha atrás en distintos tramos urbanos	102
5.31	Experimento utilizando el movimiento hacia adelante y en marcha atrás	103
5.32	Velocidad durante el experimento 5.31	104
5.33	Salida del controlador y posición del volante en el experimento 5.31	104
5.34	Rotonda con uno y dos carriles para las entradas/salidas (izquierda y derecha, respectivamente).	107
5.35	Arquitectura de control para vehículos autónomos en rotondas	108
5.36	Puntos, calles y variables usadas en el generador automático de trayectoria para rotondas	109
5.37	Cambios de carril utilizando el controlador proporcional multivariable	111
5.38	Cambios de carril en un segmento recto	111
5.39	Simulaciones en la rotonda	112
5.40	Maniobras circulando en la rotonda	113
5.41	Rotonda en las instalaciones del CAR	113
5.42	Diagrama de estado para la conducción autónoma de vehículos en rotondas reales	115
5.43	Comportamiento del sistema de control propuesto en la entrada de la rotonda	116
5.44	Funciones de pertenencia para el control lateral dentro de la rotonda	117
5.45	Cambios de carril en la rotonda	118
5.46	Comportamiento del vehículo en la rotonda en los experimentos 5.45a y 5.45b	119
5.47	Comportamiento del sistema a diferentes velocidades, circulando por el carril central de la rotonda	120
5.48	Comportamiento del vehículo en la rotonda en el experimento 5.47	121
5.49	Casos reales con la salida 2 y 3	121
5.50	Comportamiento del vehículo dentro de la rotonda en los experimentos 5.49a y 5.49b	122
5.51	Distribución de vehículos en experimentos a alta velocidad. Sensores y actuadores a bordo del vehículo autónomo	125
5.52	Detalle de un recorrido con las líneas de referencia de los carriles y el recorrido realizado por el vehículo	126
5.53	Funciones de pertenencia para altas velocidades: error angular, error lateral y salidas del controlador borroso	128
5.54	Experimento 1, conducción autónoma del volante con velocidades comprendidas entre 80 y 110 km/h	129
5.55	Velocidad del vehículo con dirección autónoma, experimento 1	129

5.56	Variables de control para la dirección del volante a altas velocidades, experimento 1	129
5.57	Experimento 2, cambio de carril a 90 km/h	130
5.58	Velocidad del vehículo con dirección autónoma en el experimento 2, cambio de carril	130
5.59	Variables de control experimento 2, cambio de carril	131
5.60	Autovía A270 entre Helmond y Eindhoven, Holanda	132
5.61	Posición de salida de los vehículos en cada prueba de clasificación del GCDC 2011	133
5.62	Imágenes de <i>Platero</i> -dorsal 3- y los miembros del grupo AUTOPÍA en las pistas de pruebas y paradas en boxes del GCDC 2011	134
5.63	Imagen con todos los equipos participantes del GCDC 2011, en las instalaciones de TNO en Helmond, Holanda	135
5.64	Arquitectura de control de <i>Platero</i> , incluyendo modificaciones para el GCDC	136
5.65	Diagrama de estados para el control longitudinal de AUTOPÍA en el GCDC	140
5.66	Funciones de pertenencia del CC y CACC por en el GCDC 2011	141
5.67	Superficies de control de los controladores borrosos utilizados por en el GCDC 2011	142
5.68	Experimento 1: Velocidades del vehículo líder -Anniway- y el seguidor -AUTOPÍA-	144
5.69	Experimento 2: Velocidades del vehículo líder -TNO- y el seguidor -AUTOPÍA-	145
5.70	Experimento 3: Velocidades del vehículo líder -TNO- y el seguidor -AUTOPÍA-	146
5.71	Error de velocidad y error de distancia en las pruebas previas al GCDC	146
5.72	Experimento 3: Posición de los vehículos en coordenadas UTM	147
5.73	Pruebas de clasificación con el líder delante	147
5.74	Error de velocidad y de distancia del experimento 5.73	148
5.75	Posición en coordenadas UTM de las pruebas: 3, 5, 8, 10, 12, 15. Junto con los fallos en los puentes	149
5.76	Pruebas de clasificación con cualquier otro vehículo delante	149
5.77	Error de velocidad y de distancia del experimento 5.76	150
5.78	Pruebas de clasificación saliendo desde el segundo semáforo, primera posición	151
5.79	Error de velocidad y de distancia del experimento 5.78	151
5.80	Pruebas de clasificación saliendo desde el segundo semáforo, segunda posición	152
5.81	Error de velocidad y de distancia del experimento 5.80	152
5.82	Tabla de resultados del GCDC 2011, tomada de: www.gcdc.net	153
5.83	Mejores perfiles de velocidad en función de las diferentes posiciones de salida	153

Índice de Tablas

3.1	Parámetros de inicialización para el perfil de velocidad en el bajo nivel . . .	41
3.2	RMSE para recorridos a baja velocidad	47
3.3	RMSE para recorridos a diferentes velocidades	52
4.1	Resumen de los parámetros del modelo ANFIS	59
4.2	Reglas neuro-borrosas para la acción del acelerador y el freno	59
4.3	Valores de salida del controlador neuro-borroso	61
4.4	Parámetros de los controladores PI e i-PI	63
4.5	Reglas borrosas para el control de cruce a bajas velocidades	65
4.6	Reglas neuro-borrosas obtenidas a través de ANFIS	67
4.7	Comparación entre los controladores	70
5.1	Reglas borrosas para la acción del acelerador y el freno	81
5.2	Descripción de las señales de tráfico utilizadas en el entorno de pruebas . . .	90
5.3	Voltajes de referencia para la palanca de cambios	99
5.4	RMSE en el movimiento en marcha atrás	102
5.5	RMSE en el movimiento en marcha atrás	103
5.6	Errores máximos permitidos en los sensores de posición velocidad y acele- ración en el GCDC	138
5.7	Parámetros exigidos por los organizadores del GCDC para el cálculo de medidas	138
5.8	Codificación en bits de la <i>Información estática de la RSU</i>	139
5.9	Reglas borrosas para el control de cruce para altas velocidades	142
5.10	Reglas borrosas para el controlador CACC	143
5.11	Error de los diferentes experimentos con el vehículo precedente	144

Capítulo 1

Introducción

*La ciencia es independiente de los medios en que
se exprese*

Carlos González Fernández-Vallejo

Hará casi 125 años, desde que el ingeniero *Karl Friedrich Benz* fuera víctima de un robo sin precedentes. Llevaba 2 años intentando perfeccionar aquel mecanismo con el que tanto había soñado, su *Motorwagen*. Pero quizás por su carácter alemán, o por el miedo a la burla de la pequeña comunidad científica de la época, no se atrevía a mostrar al mundo las capacidades de aquella maquina excepcional. Fue entonces cuando Bertha (su esposa) y dos de sus hijos, tomaron sin permiso aquel vehículo llevado sin animales, para poder ir a visitar a unos familiares. El viaje fue un éxito: 106 km en 8 horas sin carreteras ni estaciones de servicio. Este hecho ha marcado un hito para toda la humanidad. Lo que vino después, es historia.

Desde entonces, el automóvil se ha convertido en el objeto de estudio de muchos emprendedores a lo largo de todo el mundo, cambiando por completo nuestra concepción de la sociedad, la economía y la cultura, entre otras cosas. Revolucionó el mundo, creo las cadenas de producción, acortó distancias y permitió el desarrollo tecnológico, que desde entonces ha venido en acenso. Los vehículos han formado parte de nuestra vida diaria.

A pesar de haber transcurrido casi un siglo desde que Henry Ford impulsara la fabricación en serie (y con ello la popularización de los vehículos), la automatización total de la conducción y el control sobre vehículos reales ha sido considerado una idea utópica que sólo algunos grupos de investigación en todo el mundo se han atrevido a abordar.

Sin embargo, en la última década, diferentes investigaciones, proyectos, competiciones, y (sobre todo) fabricantes, vuelcan sus esfuerzos para desarrollar sistemas que permitan mejorar la conducción bien en zonas urbanas, bien en autovías (Shladover, 2007; Vaa et al., 2007).

Muchos de los prototipos desarrollados por centros de investigación han pasado a ser parte de los vehículos comerciales con gran rapidez. Así, ayudas para aparcamiento, control de velocidad, frenada de emergencia, detección de peatones, señales y coches, así como los diferentes desarrollos logrados en los sistemas ADAS (*Advance Driver Assistance Systems*), son algunas de las aplicaciones que los diferentes fabricantes de vehículos han implementado y están comercializando recientemente (Hsu et al., 2008; Fernandez Llorca et al., 2011; Burton, 2003). Aunque todavía falta algún tiempo para encontrar en las carreteras vehículos completamente autónomos.

Los vehículos autónomos son parte de los objetivos inmediatos que persiguen los Sis-

temas Inteligentes de Transporte - ITS - (*Intelligent Transportation Systems*), los cuales utilizan diferentes técnicas de control, entornos virtuales y comunicaciones, con el objetivo final de mejorar la seguridad y el confort en la conducción.

La presente tesis aúna la aplicación de técnicas de control clásico e inteligente para la conducción con vehículos autónomos. El trabajo ha sido desarrollado dentro del programa AUTOPÍA, del Centro de Automática y Robótica (CAR) de la Universidad Politécnica de Madrid y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (UPM-CSIC). A continuación se explicará el marco de la tesis y las diferentes aportaciones dentro del campo de los ITS. Posteriormente se presenta la motivación, propósito y objetivos presentados en este trabajo, así como las líneas de investigación exploradas, y las principales aportaciones alcanzadas en la presente tesis.

1.1. Propósito

La intención de la presente tesis es contribuir a la mejora de la seguridad y el confort en el control de vehículos autónomos, desarrollando nuevas técnicas y algoritmos de control que permitan hacer que la conducción autónoma de vehículos sea cada vez más fiable, y a la vez más grata para los pasajeros y conductores dentro de los vehículos. Como se mencionó anteriormente, está enmarcada dentro del programa AUTOPÍA del CAR (UPM-CSIC), el cual tiene más de 12 años de experiencia en el control de vehículos. Por lo tanto, se parte de las diferentes aportaciones previamente desarrolladas dentro del grupo (Naranjo, 2005; Milanés, 2010; Onieva, 2011).

Aunque la conducción autónoma total de los vehículos ya estaba resuelta en (Naranjo, 2005), la velocidad máxima estaba limitada a 8 km/h en tramos curvos y el confort no se había considerado en el control. Para mejorar las estrategias de control, hasta ahora implementadas dentro del grupo AUTOPÍA y dentro del área de investigación, en la presente tesis se ha realizado un estudio más profundo del control lateral para tomar curvas con diferentes ángulos y velocidades, en entornos urbanos, mejorando además la comodidad en la conducción.

La presente tesis también ha partido de las aportaciones hechas en (Milanés, 2010), tanto en el posicionamiento, utilizando unidades inerciales, como en los actuadores longitudinales (bomba hidráulica de frenado), para poder realizar las diferentes maniobras que se presentan a lo largo de este trabajo.

El control longitudinal para vehículos a gasolina propuesto en (Onieva, 2011), ha sido considerado como punto de partida para la implementación de sistemas neuro-borrosos que permiten un ajuste más fino, así como una utilización eficiente de dichos actuadores. Además, se ha realizado un estudio comparativo con diversas técnicas de control.

Las mejoras hechas en cada uno de los temas abordados en esta tesis, han permitido realizar una serie de nuevas maniobras en entornos urbanos, como: adelantamientos, marcha atrás, incorporación y maniobras dentro de rotondas y control en curvas a diferentes velocidades. Las aportaciones de la presente tesis han permitido dar un paso más dentro de las líneas del grupo AUTOPÍA, y dentro del campo de los ITS, ya que, se han realizado experimentos con vehículos reales a altas velocidades (alrededor de los 100 km/h) en circuitos de pruebas destinados para ellos y en autovías.

Finalmente la tesis profundiza en el control local de los vehículos del programa AUTOPÍA, mostrando su versatilidad en diferentes situaciones. El doctorando ha mejorado los controladores de bajo y alto nivel embarcados para lograr uno de los objetivos finales de los sistemas inteligentes de transporte: la conducción integral de vehículos autónomos en

entornos urbanos y autovías.

1.1.1. Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis es desarrollar sistemas de control para vehículos autónomos que permiten realizar maniobras individuales y cooperativas en diferentes escenarios urbanos, así como en autovías públicas.

Por ese motivo se han considerado las diferentes plataformas de pruebas con las que cuenta el programa AUTOPÍA. Estudios realizados tanto en el estado de la técnica, como en el manejo de entornos virtuales, han permitido validar los resultados presentados en esta tesis, los cuales, en su totalidad y en una fase experimental, han sido probados en vehículos reales.

Por otra parte, diferentes entornos urbanos e interurbanos como carreteras de doble sentido, curvas de diferentes ángulos, rotondas, autovías públicas y circuitos de prueba privados, han sido considerados para la validación de resultados. Además, se han considerando mayores velocidades y nuevos métodos para la generación de trayectorias en vehículos autónomos.

A lo largo del desarrollo de la presente tesis se ha pretendido avanzar más allá de las diferentes aportaciones presentadas en tesis previas (Naranjo, 2005; Milanés, 2010; Onieva, 2011), permitiendo mejorar el control *total* de vehículos autónomos. La arquitectura de control presentada en (Naranjo, 2005) y expandida en (Milanés, 2010), permite entender los algoritmos de control presentados en esta tesis, basados en su mayoría en lógica borrosa, a los actuadores (bajo nivel) de los diferentes vehículos del Programa AUTOPÍA. Éstos deben de ser adaptados según las especificaciones de cada vehículo. Por ese motivo, la presente tesis demuestra la modularidad de la arquitectura del programa AUTOPÍA (Pérez et al., 2009), la cual ha sido validada para vehículos eléctricos y propulsados a gasolina. Estos últimos tienen ventajas a la hora de realizar pruebas a altas velocidades en entornos reales, debido a su mayor autonomía energética. Sin embargo, a bajas velocidades, plantean un sistema longitudinal de control más complejo que el de los vehículos eléctricos, con lo cual, parte de las propuestas hechas en esta tesis se han implementado en estos vehículos.

En resumen, el objetivo final es lograr la conducción autónoma de vehículos, y además, mejorar la seguridad en la conducción, sobre todo en entornos urbanos, autovías y en situaciones de alto riesgo, con independencia de los vehículos que se utilicen para ello.

1.2. Estructura del trabajo

Luego de los planteamientos presentados en función de los propósitos y objetivos de esta tesis, la memoria de la misma se organiza en 5 capítulos, además del presente. Dentro de cada capítulo, y en algunas secciones, se mencionan los trabajos previos más relevantes, y que han sido tomados como punto de partida. El contenido de cada capítulo se describe a continuación:

El **capítulo 2** describe los últimos desarrollos en el campo de los ITS, enfocados sobre todo en: los sistemas ADAS, infraestructuras inteligentes y conducción autónoma de vehículos. Posteriormente se describen las últimas implementaciones desarrolladas en la industria. Las principales aportaciones de los grupos y proyectos de investigación más relevantes dentro del campo a nivel mundial. Este capítulo continúa con una explicación detallada del grupo AUTOPÍA, explicando cada una de los vehículos con los que cuenta y que han sido utilizados en diferentes etapas de esta tesis. Además, se presenta una delineación de las pistas de pruebas del CAR y las principales áreas de investigación que

se llevan a cabo dentro del grupo. Finalmente, se presenta el diagrama de control para la conducción de vehículos autónomos (Pérez et al., 2009). Éste sirve de referencia para los dos capítulos siguientes, los cuales describen las aportaciones más importantes, al control lateral y longitudinal, de la presente tesis.

Las nuevas aportaciones hechas para el control lateral de vehículos autónomos se presentan en el **capítulo 3**. Así, se describe una nueva arquitectura de control en cascada, implementada en las furgonetas eléctricas del grupo AUTOPÍA, donde se plantean dos variables de control: la posición y la velocidad angular del volante. Se describen los objetivos buscados, la implementación realizada y las mejoras alcanzadas en esta tesis para el control lateral de vehículos autónomos en entornos urbanos.

El **capítulo 4** aborda uno de los problemas más difíciles dentro de la conducción automática de vehículos: el control longitudinal a bajas velocidades para vehículos con motores de combustión. Al principio del capítulo, se parte del controlador borroso propuesto en (Onieva, 2011), y utilizando técnicas neuro-borrosa se logra mejorar el desempeño de dicho controlador sobre los actuadores: acelerador y freno. La segunda parte de la investigación consiste en realizar un estudio comparativo con otras técnicas de control, utilizando controladores con una salida directa sobre los actuadores. De esta manera, se expone cómo los controladores neuro-borrosos presentan importantes mejoras al problema planteado.

El **capítulo 5** presenta una serie de experimentos que validan las aportaciones descritas en los capítulos previos, además de otras contribuciones a la arquitectura de control. Maniobras cooperativas e individuales, tales como: adelantamientos con tres vehículos, circulación en marcha atrás, control en rotondas y control crucero asistido a altas velocidades, entre otras, se presentan en diferentes secciones del capítulo. La mayoría de los experimentos se han desarrollado en las instalaciones del CAR, sin embargo, los últimos a altas velocidades, han sido validados en otros circuitos de pruebas y carreteras reales.

Finalmente, en el **capítulo 6** se presentan las conclusiones y aportaciones de la presente tesis, así como, las diferentes líneas de investigación que se generan a raíz de las contribuciones presentadas en esta tesis.

1.3. Aportaciones

En la figura 1.1 se esquematizan las diferentes aportaciones presentadas a lo largo de la tesis, en función del vehículo utilizado. Se puede apreciar, que en una primera instancia, el trabajo del doctorando estaba enfocado únicamente al control de vehículos eléctricos (las 2 furgonetas, parte superior de la figura 1.1)(Pérez, 2009). Sin embargo, y debido principalmente a lo rápido que evoluciona el estado de la técnica, se han probado los diferentes algoritmos, primero para entornos urbanos y para autovías, en los vehículos del grupo AUTOPÍA (cinco vehículos), mostrando buenos resultados y demostrando la portabilidad y modularidad de los mismos (Pérez et al., 2009).

A juicio del doctorando, las principales aportaciones de la presente tesis son:

- El Desarrollo de un control continuo y estable del volante, el cual permite optimizar las prestaciones de un controlador clásico (PID para el bajo nivel), y las ventajas de la lógica borrosa para emular la conducción humana. Para ello, ha sido necesaria la consideración de la velocidad real del vehículo, lo que permiten modificar la acción de control en función de las condiciones del entorno.
- El estudio, mejora y análisis de diferentes técnicas de control que permiten mejorar las prestaciones de los vehículos propulsados a gasolina a bajas velocidades. Se ha

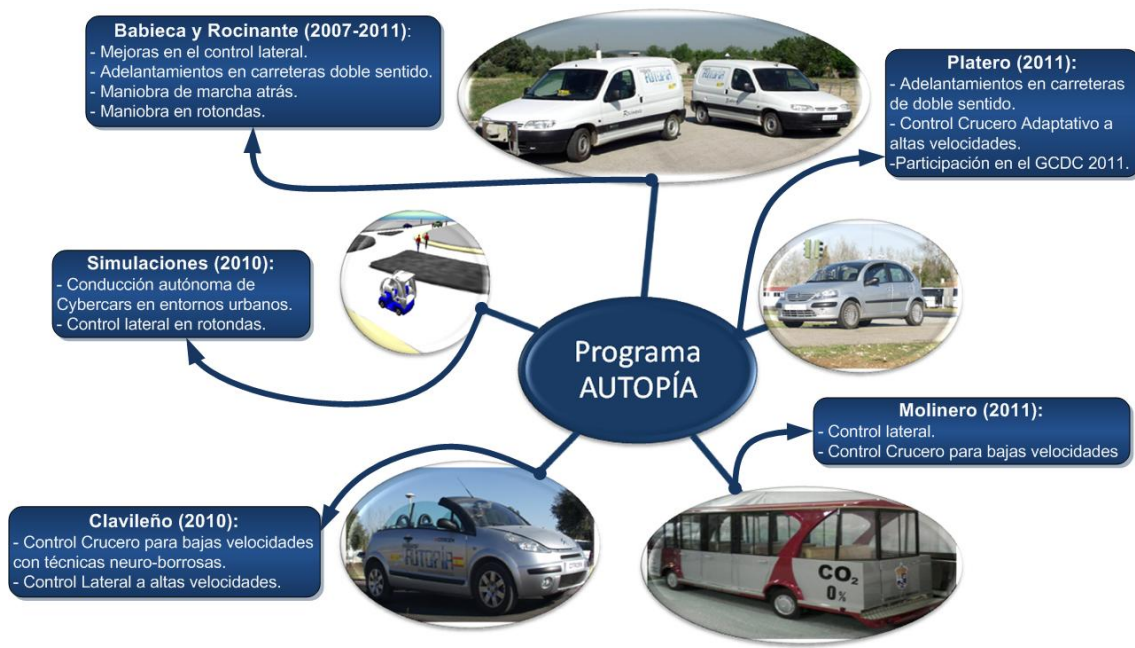


Figura 1.1: Aportaciones de la tesis dentro del programa AUTOPÍA

tomado como punto de partida el controlador borroso presentado en (Onieva, 2011), y se han utilizado técnicas de control neuro-borroso para su ajuste. Además, se ha realizado un estudio comparativo con otras técnicas de control, para poder exponer las ventajas y desventajas que ofrecen sistemas neuro-borroso para esta aplicación.

- La simulación e implementación de maniobras en entornos urbanos. Se destacan la conducción autónoma en curvas de curvaturas diferentes y tomadas a diferentes velocidades. La incorporación, control y salida de rotondas. Por último, la utilización de curvas paramétricas ha permitido mejorar la generación de trayectoria, y con ello el control.
- Automatización y control del sistema de marcha atrás del vehículo para permitir la salida de calles bloqueadas.
- La utilización de sensores RFIDs, con gran alcance y bajo coste, acoplados dentro de la arquitectura de control. Esto ha permitido una comunicación Infraestructura-Vehículo, la cual permite definir la velocidad de referencia del vehículo en modo automático, así como cualquier otra eventualidad asociada a tramos o entornos urbanos.
- El ajuste de los controladores, tanto laterales como longitudinales, para la conducción autónoma en autovías. Esto ha permitido controlar vehículos a altas velocidades (alrededor de los 100 km/h) y participar en competiciones internacionales para vehículos autónomos (GCDC-2011) y abriendo el horizonte a pruebas en autovías reales.

1.4. Difusión de los resultados

En los años de desarrollo de esta tesis, el doctorando ha participado en una serie de proyectos de investigación, nacionales y europeos, que han permitido la colaboración con diferentes centros de investigación y universidades.

Del mismo modo, el doctorando también ha tenido la oportunidad de realizar estancias breves en dos importantes centros de investigación:

- The Intelligent Control Systems Laboratory (ICSL), de la Universidad de Griffith, en Brisbane-Australia, bajo la supervisión del profesor Ljubo Vlacic.
- The Equipe-Projet IMARA, del Centre de Recherche INRIA Paris-Rocquencourt, Francia, bajo la supervisión del Dr. Fawzi Nashashibi.

Consecuencia de las investigaciones llevadas a cabo durante este tiempo dentro del grupo AUTOPIA, y en algunos casos, en colaboraciones con otros grupos de investigación, se han realizado una serie de contribuciones científicas que avalan el trabajo presentado en esta tesis. Éstas se mencionan a continuación:

Publicaciones en revistas

Título: Cascade Architecture for Lateral Control in Autonomous Vehicle

Autores: J. Pérez, V. Milanés y E. Onieva

Revista: Transactions on Intelligent Transportation Systems, IEEE

Volumen: 12, **Páginas:** 73-82, **Año:** 2011

Título: An RFID-Based Intelligent Vehicle Speed Controller Using Active Traffic Signals

Autores: J. Pérez, F. Seco, V. Milanés, A. Jiménez, J.C. Díaz y T. de Pedro

Revista: Sensors

Volumen: 10, **Páginas:** 5872-5887, **Año:** 2010

Título: Overtaking with autonomous vehicles on two-way roads

Autores: J. Perez, V. Milanés, J. Alonso, E. Onieva y T. de Pedro

Revista: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial

Volumen: 7, **Páginas:** 25-33, **Año:** 2010

Título: Sistema de ayuda a la conducción en curvas para vehículos reales

Autores: J. Pérez, V. Milanés, J. Villagra, E. Onieva y C. Gonzalez

Revista: Dyna, Ingeniería e Industria

Volumen: 86, **Páginas:** 95-104, **Año:** 2011

Título: Lateral Power Controller for Unmanned Vehicles

Autores: V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva, C. González y T. de Pedro

Revista: Electrical Review

Volumen: 86, **Páginas:** 207-211, **Año:** 2010

Título: Low-Speed Longitudinal Controllers for Mass-Produced Cars: A Comparative Study

Autores: V. Milanés, J. Villagra, J. Pérez, y C. Gonzalez

Revista: Transactions on Industrial Electronics, IEEE

Volumen: 59, n.1, **Páginas:** 620-628, **Año:** 2012

Título: Driving by driverless vehicles in urban environment

Autores: J. Pérez, J. Villagra, E. Onieva, V. Milanes, T. de Pedro y L. Vlacic

Revista: Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2011

Año: 2011

Título: AUTOPIA in the GCDC

Autores: V. Milanes, J. Pérez, C. González, J. Godoy, J. Villagrà y E. Onieva

Revista: GCDC proceeding

Año: 2011

Publicaciones en congresos

Título: Comunicación entre Vehículos Autónomos en Tiempo Real, para Maniobras de Alto Riesgo

Autores: J. Pérez, E. Onieva, T. de Pedro, R. García, J. Alonso, V. Milanés y C. Gonzalez

Congreso: Proc. XXIX Jornadas de Automática JATA08

Lugar: Tarragona, España, **Fecha:** Septiembre 2008

Título: Modularity, adaptability and evolution in the AUTOPIA architecture for control of autonomous vehicles

Autores: J. Pérez, C. Gonzalez, V. Milanes, E. Onieva, J. Godoy y T. de Pedro

Congreso: Proc. IEEE International Conference on Mechatronics ICM 2009

Lugar: Malaga, España, **Fecha:** Abril 2009

Título: Electric power controller for steering wheel management in electric cars

Autores: V. Milanes, J. Pérez, E. Onieva, C. González y T. de Pedro

Congreso: CPE '09. Compatability and Power Electronics

Lugar: Badajoz, España, **Fecha:** Mayo 2009

Título: Design and Implementation of a Neuro Fuzzy System for Longitudinal Control of Autonomous Vehicles

Autores: J. Pérez, A. Gajate, V. Milanes, E. Onieva y M. Santos

Congreso: Proc. IEEE World Congress on Computational Intelligence WCCI 2010

Lugar: Barcelona, España, **Fecha:** Junio 2010

Título: Manoeuvres for driverless vehicles using GPS and lidar information in urban circuits

Autores: J. Pérez, E. Onieva, V. Milanés, J. Villagrà, T. de Pedro y L. Vlacic

Congreso: Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2011

Lugar: Canarias, España, **Fecha:** Febrero 2011

Título: Longitudinal fuzzy control for autonomous overtaking

Autores: J. Pérez, V. Milanes, E. Onieva, J. Godoy y J. Alonso

Congreso: Proc. IEEE International Conference on Mechatronics ICM 2011

Lugar: Estambul, turquía, **Fecha:** Abril 2011

Título: Autonomous driving manoeuvres in urban road traffic environment: a study on roundabouts

Autores: J. Pérez, V. Milanes, T de Pedro y L. Vlacic

Congreso: 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC)

Lugar: Milán, Italia, **Fecha:** Agosto 2011

Título: Enhancing student learning: On-line interactive laboratory for modelling of real world control system applications

Autores: J. Pérez, S. Dormido y L. Vlacic

Congreso: 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC)

Lugar: Milán, Italia, **Fecha:** Agosto 2011

Patentes

Título: Dispositivo y procedimiento para la implementación de una maniobra de emergencia para abortar adelantamientos

Autores: J. Pérez, V. Milanés, E. Onieva, J. Godoy, J. Villagrà y C. González

Enviada: 15 de junio de 2011

Estado: En espera, **Lugar:** España

Capítulo 2

Estado del arte

*Cuando pensamos que el día de mañana nunca
llegará, ya se ha convertido en el ayer.*

Henry Ford

2.1. Los Sistemas inteligentes de transporte

Los ITS surgen en la década de los años 90 con el objetivo principal de incrementar la eficacia y seguridad del transporte. Los ITS se presentan como una combinación de distintos sistemas avanzados de información, comunicación y control aplicados tanto a los vehículos como a las infraestructuras. Aunque el término se asocia directamente al transporte por carretera, éste tiene un uso más extendido. Un ejemplo de ello es la definición proporcionada por la Dirección General de Energía y Transporte de la Unión Europea en la que se considera que los ITS pueden ser aplicados perfectamente a *autopistas, ferrocarriles, transporte marítimo y aéreo, así como las conexiones entre estos distintos tipos de transporte*.

En esta tesis, el trabajo realizado se centra en el ámbito del transporte en carreteras. Los ITS pueden – dependiendo de su complejidad – tanto interactuar con un solo vehículo, como controlar el tráfico de toda una red de carreteras. Entre sus objetivos específicos se encuentran la mejora de la seguridad en las carreteras, la optimización de la fluidez del tráfico, la reducción de emisiones contaminantes y el control de sistemas de transporte público. La amplitud de estos objetivos provoca que sea prácticamente imposible que un mismo grupo o proyecto de investigación cubra todas las áreas que los integran, por lo que hoy en día podemos encontrar una gran diversidad de grupos especializados en áreas concretas.

En este capítulo comenzaremos explicando el alcance de la tesis para ver posteriormente el estado del arte de grupos, proyectos de investigación y productos comerciales más relevantes. Actualmente, y debido a la gran expansión que ha tenido el campo en los últimos años, existen muchos grupos, proyectos de investigación y empresas que trabajan cooperativamente para el desarrollo de nuevos sistemas de control para vehículos autónomos. Los más importantes ya han sido mencionados en (Naranjo, 2005; Milanés, 2010; Onieva, 2011). En los siguientes apartados se describen los grupos y proyectos directamente relacionados, o que han influido marcadamente, con las aportaciones de esta tesis y con el grupo AUTOPÍA. Por último se presentará una descripción del mismo, y se describirán los diferentes trabajos previos que han servido de punto de partida para esta investigación.

2.1.1. Alcance de la tesis

Los primeros desarrollos de la automática en el ámbito del automóvil empezaron a principios de los años 60. Estos sistemas, conocidos como Sistemas Avanzados para el Control de Vehículos - AVCS - (*Advanced Vehicle Control Systems*) (Barrick, 1962), han estado enfocados en mejorar el control de los vehículos. Consecuentemente, y con el avance en las técnicas de control, tecnologías de las telecomunicaciones y la informática, en los últimos 20 años los sistemas AVCS han ido evolucionando hasta servirse de la información proveniente de la infraestructura, e incluso empezar a tomar el control parcial de los vehículos, derivando así en lo que hoy conocemos como ITS.

Los ITS se basan en la utilización sinérgica de las distintas técnicas existentes en el área de control, comunicaciones, entornos virtuales e informática con el fin de mejorar la seguridad en la conducción. Además, pretenden utilizar de forma eficiente los recursos energéticos de los vehículos, disminuyendo los congestionamientos en grandes ciudades, la contaminación y los tiempos de transporte.

Actualmente, existen diversos sistemas que permiten ayudar en la conducción. Éstos son conocidos como sistemas ADAS. Entre los más importantes, y ahora comercializados, destacan: los sistemas de seguridad activa - ASS - (*Active Safety Systems*), aviso del límite de Velocidad, sistemas de frenada de emergencia - ABS - (*Antilock Braking System*), comunicación de vehículo a vehículo y con la infraestructura (V2V y V2I) y sistemas inteligentes para aparcamiento automático, entre otros.

En la figura 2.1 se muestran las motivaciones, técnicas y aplicaciones de los sistemas inteligentes de transporte. Dos pilares propician la investigación, desarrollo e implementación de los ITS: la base tecnológica y la base social (parte izquierda superior de la figura 2.1). El primero permite la implementación de las últimas técnicas, herramientas y propuestas que se encuentran disponibles en la industria y en el ámbito académico. El segundo se refiere a la repercusión de los sistemas de transporte dentro de nuestra sociedad, es decir, los diversos problemas generados por la necesidad de movilidad de la población, y con ello el aumento del tráfico: congestionamientos, accidentes y las repercusiones económicas y medioambientales que éstos suponen.

Aunque los ITS, como disciplina de investigación, cuentan con poco tiempo, existe un gran abanico de temas específicos. En el recuadro derecho superior de la figura 2.1 se mencionan las áreas y técnicas de investigación más relevantes dentro del campo. Esta enumeración puede expandirse o redefinirse, ya que el campo de los ITS está en constante evolución.

En la parte inferior derecha de la figura 2.1, se puntualizan los tres principales aplicaciones (por orden cronológico de aparición) dentro de los sistemas ITS: los sistemas ADAS, las infraestructuras inteligentes y la conducción autónoma de vehículos. Diversos sistemas ADAS han sido comercializados en los últimos años. Entre ellos:

- Control de Crucero -CC-: permite una velocidad de referencia preestablecida. Comercializado por: Mercedes Benz, BMW, Lexus, Audi, Volkswagen, Volvo, entre otros.
- Control Crucero Adaptativo -ACC-: Es una versión más avanzada del CC, está comercializado por menos fabricantes, el más conocido el del S60 de Volvo.
- Preaviso de Colisión: es un sistema de aviso ante posibles colisiones. Las últimas versiones toman el control parcial de vehículos para evitar daños peores. Comercializado por: Audi, Ford, Honda, Nissan, Mercedes Benz, entre otros.

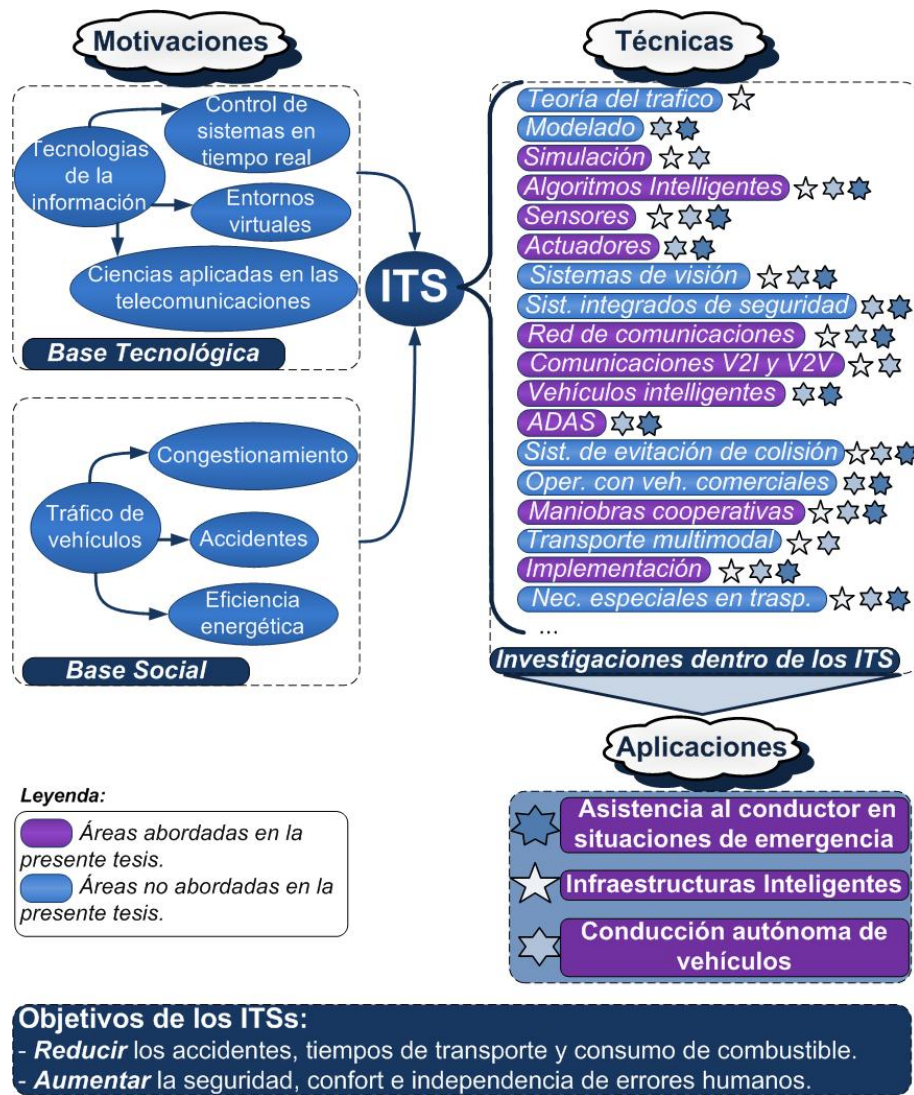


Figura 2.1: Aportaciones dentro del campo de los Sistemas Inteligentes de Transporte

- Aparcamiento automático: solo funciona bajo condiciones especiales (en líneas paralelas, y con un 50 % más de tamaño del vehículo). Comercializado por Siemens.
- El control de estabilidad -ESC-: ayuda a mantener la estabilidad del vehículo en posibles situaciones de riesgo. Comercializado por Alfa Romeo, Audi, Citroën Renault, entre otros.

La otra aplicación de gran importancia dentro de los ITS son las infraestructuras inteligentes, las cuales pretenden ayudar al conductor (incluso a los sistemas ADAS) a realizar una conducción más segura. Aunque no están tan desarrolladas como los primeros, existen algunas implementaciones destacables como: sistemas de aviso de accidentes en autovías, sistemas de aviso en aparcamientos cubiertos, sistemas de detección del límite de velocidad y olas verdes, entre otros.

La tercera aplicación, la conducción autónoma de vehículos, se encuentra aún en fase de investigación y desarrollo. Actualmente, no es posible utilizar vehículos que circulen por autovías públicas de forma totalmente autónoma. Por ese motivo, este último punto

se presenta como la piedra angular de la presente tesis, y donde se centran las principales aportaciones de la misma. El hilo conductor de este trabajo se centra en el control de vehículos automáticos. Sin embargo, y dada la interrelación que existe entre las diferentes áreas de investigación dentro del campo de los ITS, también se han realizado contribuciones en otros puntos. Específicamente, las áreas abordadas en la presente tesis están indicadas con color violeta en la figura 2.1. En una primera instancia solo se realizaron aportaciones para entornos urbanos con vehículos eléctricos (Pérez, 2009), no obstante, y debido a la portabilidad de la arquitectura de control desde la que se ha partido en el programa AUTOPÍA (Pérez et al., 2009) y las aportaciones presentadas en la presente tesis, los controladores han sido ajustados para realizar maniobras con vehículos impulsados a gasolina en autovías, con condiciones adversas y a más velocidad.

2.1.2. Situación actual

El gran alcance y el creciente auge de los ITS hacen que sea muy difícil que un solo grupo o proyecto de investigación cubra todas las áreas que lo integran. Como se mostró en la figura 2.1, dichas áreas están en constante expansión y dependen directamente del avance tecnológico. Esta diversidad permite que cada grupo se especialice en áreas concretas.

A modo de ejemplo destacamos los avances alcanzados en los proyectos europeos: *HA-VEit* y *SPITS*. En el primero se presenta una arquitectura de control para mejorar la seguridad en las vías, la eficiencia energética y el confort en la conducción a través de un sistema virtual que toma el control parcial y total del vehículo en función de las diferentes situaciones de riesgo. Lo conforman diferentes empresas y centros de investigación, así como: Continental, Volvo, Volkswagen, SICK, INRIA, la universidad de Budapest, entre otros ¹. El proyecto SPITS (*Strategic Platform for ITS*) es un proyecto holandés encargado de desarrollar nuevos conceptos en la comunicación entre vehículos inteligentes. Este ha permitido dar un paso adelante en la concepción de los protocolos de comunicación entre vehículos e infraestructura, utilizando un gran número de vehículos en las pruebas finales (más de cien) ².

Por otra parte, los grupos de investigación americanos han desarrollado importantes sistemas de percepción de entornos y toma de decisiones. La competición *DARPA Urban Challenge* organizada por el departamento de defensa de los Estados Unidos (*Defense Advance Research Projects Agency*) es la mayor competición de vehículos autónomos a nivel mundial. La última edición se ha desarrollado en Noviembre de 2007 en Victorville, California. En esta edición, el vehículo BOSS, del equipo Tartan Racing de la universidad Carnegie Mellon (Urmson et al., 2008), resultó ganador tras recorrer 85 km en algo más de cuatro horas. Otros grupos participantes han sido el NAVLAB ³, la universidad de Virginia Tech ⁴ y el instituto tecnológico de Karlsruhe ⁵.

Otras empresas como *Google* están apostando abiertamente por el desarrollo masivo de vehículos autónomos. El proyecto *Google Driverless Car* se ha realizado en colaboración con el laboratorio de Inteligencia Artificial de Stanford y quince ingenieros de *Google*, algunos de los cuales han trabajado previamente en el *DARPA Challenge*. El proyecto cuenta con una flota de siete vehículos, formada por seis *Toyota Prius* y un *Audi TT*. En el año 2010, se realizaron diversos experimentos de su sistema en las carreteras de Estados Unidos, donde el vehículo circuló en entornos reales. En total *Google* sumó 1.600

¹<http://www.haveit-eu.org>

²<http://spits-project.com/>

³<http://www.ri.cmu.edu/research-project-detail.html?project-id=436menu-id=261>

⁴<http://www.victortango.com/>

⁵www.mrt.kit.edu/annieway/

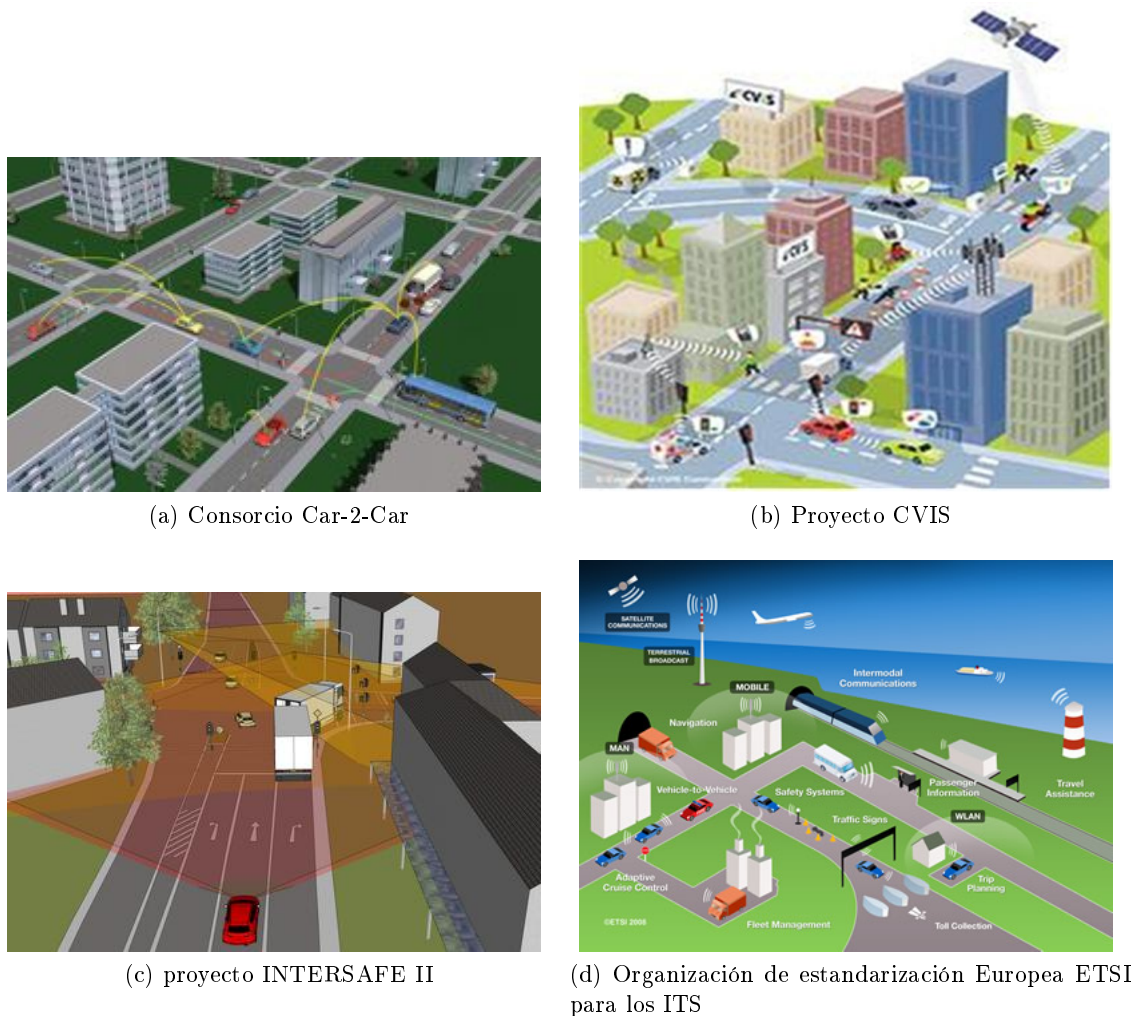


Figura 2.2: Diferentes propuestas para las comunicaciones en los ITS

km de conducción totalmente autónoma, y 230.000 km con alguna intervención ocasional del conductor humano.

El Ministerio de Transporte de Japón se ocupa de regular la seguridad de la industria del automóvil. Su programa más relevante es el *Advance Safety Vehicle* (ASV), bajo cuyos auspicios todos los grandes OEM japoneses han desarrollado técnicas para mejorar la seguridad, como sistemas ITS de advertencia y ayuda. Por ejemplo, *airbags* externos para proteger a los peatones o para ciclomotores, parabrisas que repelen el agua, etc. Es importante mencionar que estos desarrollos son financiados por las compañías, el ministerio se limita a dirigirlos y coordinarlos.

Desde el punto de vista de las comunicaciones entre vehículo e infraestructura, éstas son una realidad cada vez más patente. Es por ello que muchos de los proyectos en los últimos años centran sus esfuerzos en esta línea. En la figura 2.2 se muestran algunas de las propuestas desarrolladas en varios proyectos o iniciativas: Car-2-Car, CVIS, INTERSAFE II, entre otros. El desarrollo de la arquitectura CALM (*Communications Access for Land Mobiles*) permite la definición de protocolos e interfaces para una gran cantidad de escenarios, abarcando una alta variedad de modos de transmisión y múltiples métodos, basado en la nueva tecnología IPv6, dedicada a los sistemas ITS (Ernst et al., 2009).

2.2. Grupos de Investigación

Los fabricantes de automóviles invierten grandes cantidades de dinero para el desarrollo de vehículos más seguros. Por lo que existen muchos grupos de investigación a nivel mundial dedicados a las mejoras de los sistemas comerciales de ayuda a la conducción. Otros están enfocados en desarrollar nuevos dispositivos y técnicas que permitan hacer estos sistemas más eficientes y fiables. A continuación se repasan algunos de los grupos más influyentes en esta línea de investigación.

2.2.1. INSIA

El Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA) es un centro perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) e integrado en el parque científico y tecnológico de la UPM.

Actualmente, el INSIA representa uno de los centros de I+D+I de referencia en el sector de la automoción en España, además de ser un laboratorio oficial autorizado para la homologación en diversos reglamentos y directivas, así como en reformas de importancia. El INSIA lleva a cabo actividades de investigación, formación, desarrollo e innovación en diversas áreas como los accidentes de tráfico, la seguridad pasiva en vehículos de transporte (autobuses, autocares y vehículos industriales), sistemas inteligentes, ingeniería de vehículos y biomecánica.

Los estudios desarrollados por este instituto se guían por siete líneas de investigación fundamentales: 1) la mejora de la seguridad en autobuses, autocares y en el transporte de mercancías, 2) análisis de las causas y consecuencias de los accidentes de tráfico, 3) biomecánica aplicada a la mejora de la seguridad pasiva de vehículos, 4) desarrollo y aplicación de modelos para la evaluación y predicción de los impactos del transporte por carretera en la seguridad y medio ambiente, 5) sistemas de asistencia al conductor relacionados con el control inteligente de la velocidad, 6) sistemas alternativos de propulsión e impacto medioambiental de los vehículos automóviles y 7) mecánica computacional aplicada al estudio del comportamiento dinámico de los vehículos (Aparicio-Izquierdo et al., 2001).

2.2.2. IMARA

El grupo IMARA (*Informatique, Mathématiques et Automatique pour la Route Automatisée*) forma parte del INRIA (*Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*), y lleva más de quince años investigando en ITS. Tiene tres líneas de investigación: 1) Percepción, 2) Control de vehículos eléctricos -Cybercars- y 3) Comunicaciones.

Destacamos la trayectoria del programa LaRA (*La Route Automatisée*) que surgió en el año 1997 de un consorcio de investigación enfocado al estudio de los sistemas para la asistencia y automatización de la conducción. Promovido inicialmente por tres organismos del gobierno Francés: el INRETS (*Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité*), el INRIA y el LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*); el programa LaRA estudia cuatro escenarios claves en las carreteras francesas: las carreteras rurales, locales, interurbanas y las redes de circulación de las grandes ciudades; desarrollando nuevas tecnologías que incrementen la seguridad, el confort y la eficiencia del transporte por carretera (figura 2.3c).

El objetivo final de este proyecto es eliminar la necesidad de un conductor humano, al menos en situaciones particulares tales como autopistas dedicadas y situaciones de tráfico urbano a bajas velocidades. En la figura 2.3a y 2.3b se muestran dos de los vehículos del



(a) Proyecto AMARE



(b) CyberBus



(c) Vehículos del proyecto LaRA

Figura 2.3: Vehículos del grupo IMARA, del INRIA en París-Rocquencourt, Francia

equipo IMARA, un Peugeot 107 eléctrico del proyecto AMARE y un *cyberbus* del proyecto Citymovil ⁶, respectivamente.

2.2.3. Centro de Investigación FIAT

El Centro de Investigación FIAT -CRF-(*Centro Ricerche FIAT*) se creó en 1976 como centro de referencia para la innovación, investigación y desarrollo del grupo FIAT. Actualmente es reconocido a nivel internacional como un centro de excelencia para el desarrollo de soluciones efectivas e innovadoras con costes competitivos, que además promueve la transferencia tecnológica y el entrenamiento de personal altamente cualificado. Todas las compañías del grupo FIAT consideran al CRF como la bandera estratégica de innovación que desempeña el papel fundamental para el crecimiento tecnológico del grupo.

Tras casi 35 años en el sector de la investigación, el CRF cuenta hoy en día con más de 150 universidades y centros de investigación asociados a nivel mundial, los cuales, sumados a los más de 1.000 colaboradores del sector industrial, constituyen una amplia red global de innovación. En cuanto a sus líneas de investigación, el CRF se centra en el estudio de nuevas soluciones para la propulsión de vehículos que permitan reducir tanto las emisiones como la contaminación acústica. Por otro lado, el CRF estudia la optimización del consumo de combustible utilizando la inclusión de nuevos materiales que permitan disminuir el peso del vehículo e introducir mejoras aerodinámicas que aumenten la eficiencia de la conducción, sin olvidar nunca que el objetivo final es el desarrollo de vehículos más seguros, confortables y ecológicos.

Una de las aportaciones más relevantes del CRF y el grupo FIAT a día de hoy ha sido el programa AUTONOMY. Este programa, iniciado en 1994, se enfoca en el desarrollo y adaptación de vehículos para facilitar el acceso y mejorar tanto el confort como la inde-

⁶<http://www.citymobil-project.eu/>



Figura 2.4: Vehículo del programa FIAT Autonomy

pendencia de los conductores y pasajeros con discapacidades físicas. Este programa cuenta además con simuladores de conducción que permiten a un personal especializado el estudio de las capacidades de conducción de las personas con necesidades especiales, analizando tanto las capacidades motrices del conductor como su capacidad de reacción ante estímulos visuales y auditivos.

2.2.4. Robesafe -Universidad de Alcalá-

El grupo *Robe-safe* de la Universidad de Alcalá de Henares (Madrid) está enfocado en los sistemas de percepción aplicado a la robótica móvil y la seguridad en las vías. Desde el año 2001 han trabajado estrechamente con el programa AUTOPÍA, gracias a proyectos conjuntos y la proximidad geográfica entre ambos equipos (Sotelo et al., 2004a; Naranjo et al., 2009; Fernandez Llorca et al., 2011). Dentro de este grupo, estudiantes y doctores centran su trabajo en el desarrollo de sistema de ayuda a la conducción (ADAS) que advierten al conductor sobre posibles situaciones de peligro, trabajando en los denominados sistemas *e-safety*. En los últimos años se ha convertido en uno de los referentes españoles en la transferencia de tecnologías a la industria del automóvil y de sectores auxiliares como los encargados del mantenimiento de las carreteras ⁷.

2.2.5. VisLab -Universidad de Parma-

El grupo *VisLab* cuenta con una gran experiencia en sistemas de visión artificial aplicados a vehículos autónomos. Desde 1989 la universidad de Parma ha participado en importantes proyectos como el PROMETHEUS y el ARGO (Broggi et al., 1999, 2010).

En el año 2010 realizaron una de las mayores hazañas alcanzadas hasta ahora en la conducción de vehículos autónomos: un recorrido entre Parma (Italia) y Shangai (China) -13.000 km aproximadamente-, en tres meses de viaje. El vehículo autónomo recibía las posiciones del GPS de un vehículo predecesor, el cual estaba conducido manualmente. La figura 2.5 muestra una de las escenas del recorrido ⁸.

⁷<http://www.robSAFE.com/>

⁸<http://viac.vislab.it/>



Figura 2.5: Proyecto VIAC, en el recorrido internacional desde Parma a Shangai

2.2.6. Universidad de Griffith

La Universidad de Griffith ha creado, en conjunto con el gobierno australiano, el sector privado y otras universidades del país; un laboratorio para la investigación de ITS con sede en la universidad. Dentro de este laboratorio trabajan en la cooperación de vehículos autónomos en tareas como el control de la distancia al vehículo precedente en cruces, adelantamientos y conducción cooperativa (Vlacic et al., 2011; Pérez et al., 2011b). Además, se han realizado experimentos con prototipos en los que intervienen varios vehículos que confluyen en un cruce, siendo capaces de salir de la intersección de manera coordinada y sin colisionar. En los últimos años han establecido relaciones con el grupo IMARA, implementando sus algoritmos de control en sus cybercars.

2.2.7. PATH

El consorcio PATH (*Partners for Advance Transit and Highways*) se creó en 1986. Está formado por el Instituto de Estudios de Transporte de la Universidad de California -UC-, Berkeley, en colaboración con el Departamento de Transporte del estado de California. El PATH es un programa multidisciplinar que cuenta con investigadores, profesores y estudiantes de todas las universidades del estado de California además de la colaboración de la industria privada, agencias gubernamentales e instituciones sin ánimo de lucro. Cuenta con una plantilla de 45 personas a tiempo completo. Este programa apoya la investigación de cerca de 50 profesores de la universidad y 90 estudiantes.

El objetivo de este programa es el desarrollo de estrategias y tecnologías innovadoras en el campo de los sistemas inteligentes de transporte con la finalidad de mejorar la seguridad, flexibilidad, movilidad y administración de los sistemas de transporte del estado de California, Estados Unidos y todo el mundo.

A largo plazo, este programa plantea la resolución de los problemas de tráfico mediante la automatización total o parcial de los vehículos. Su trabajo se centra en el establecimiento de vías cerradas para el uso exclusivo de vehículos autónomos. Su principal foco de atención está en las caravanas de vehículos autónomos (*Platooning*) (Sheikholeslam y Desoer, 1992), principalmente en autopistas (Shladover, 2007). En el año 1997 tuvo lugar una demostración con ocho vehículos autónomos capaces de circular a una distancia de 6,5 metros (figura 2.6).



Figura 2.6: Caravana de vehículo del PATH

2.3. Proyectos Europeos de Investigación

En esta sección se mencionan algunos de los proyectos de investigación donde participan, o han participado, los grupos descritos anteriormente.

2.3.0.1. COOPERS

COOPERS (*CO-OPerative SystEms for Intelligent Road Safety*) es un proyecto del FP6, enfocado en el desarrollo de aplicaciones telemáticas. El objetivo es gestionar el tráfico de forma cooperativa entre el vehículo y la infraestructura. Esta actividad permitirá salvar la brecha del desarrollo de aplicaciones telemáticas entre la industria de la automoción y los operadores de la infraestructura. El objetivo es mejorar la seguridad de la carretera dirigiendo y actualizando la comunicación de la información de tráfico entre la infraestructura y los vehículos en una sección de la carretera. COOPERS evalúa las prestaciones de las tecnologías de comunicación: DAB, DVB-H, GSM/GPRS, WiMAX, CALM-IR, y CALM-M5 en una comunicación I2V bi-direccional. La unidad embarcada en este proyecto consiste en una puerta de comunicación para las tecnologías definidas y un PC a bordo que incluye una unidad de posicionamiento. La unidad de la carretera combinará un controlador RSU (*Road Site Unit*) con puerta de comunicación de corto alcance con el vehículo así como con el centro de control y una plataforma de gestión de sensores ⁹.

2.3.0.2. CyberCars

Un nuevo concepto de conducción de vehículos autónomos, utilizando vehículos de propulsión eléctrica, ha sido desarrollado en los proyectos Cybercars, Cybercars-2 y CyberC3. Los *Cybercar* son vehículos que circulan de forma totalmente autónoma. Generalmente están conformados por una flota de vehículos para pasajeros o mercancías, en una red de caminos con baja demanda y con capacidad para llegar puerta a puerta. En el primer proyecto el grupo IMARA, del centro de investigación INRIA (Francia), ha sido el encargado de coordinar e implementar diferentes maniobras en entornos urbanos utilizando estos vehículos ¹⁰.

⁹<http://www.coopers-ip.eu/>

¹⁰<http://www.cybercars.org/>



Figura 2.7: Diferentes tipos de Cybercars

El proyecto CyberCars -2, se orientó al estudio de la cooperación basada en comunicaciones de corto alcance entre vehículos autónomos y vehículos operados por personas. Los resultados presentados para esta segunda versión del proyecto fueron de gran relevancia debido a que se desarrolló e implementó una arquitectura de control de vehículos autónomos que, mediante un sistema de comunicaciones, eran capaces de implementar maniobras de cooperación entre tres vehículos completamente automatizados (Naranjo et al., 2009). Los vehículos utilizados fueron un *CyberCar* del INRIA, un *Smart* de TNO (Holanda) y un Citroën C3 Pluriel del Programa AUTOPÍA.

La última versión de esta serie de proyectos, tiene como objetivo el análisis del desempeño de este tipo de vehículos eléctricos biplaza en zonas con alta densidad de tráfico (Xia et al., 2010). El sistema se validó experimentalmente en ciudades asiáticas de alta densidad de población, las cuales presentan óptimas condiciones para la inclusión de este tipo de vehículos en el mercado ¹¹. En la figura 2.7 se muestran algunos ejemplos de *CyberCars*.

El proyecto CyberCars ha servido de punto de partida a un gran número de proyectos europeos en la misma línea: CyberMove ¹², Netmovil ¹³, Citymovil, entre otros.

2.3.0.3. Iniciativa e-Safety

e-Safety es una iniciativa conjunta de la Comisión Europea, la industria y otros organismos con la finalidad de promover el desarrollo, despliegue y utilización de sistemas inteligentes de seguridad en vehículos. Estos sistemas utilizan tecnologías de la información y la comunicación en soluciones inteligentes con el fin de incrementar la seguridad y reducir el número de accidentes en las carreteras europeas. *e-Safety* es el pilar primordial de la Iniciativa para el Vehículo Inteligente, englobando diversos proyectos financiados por la Comunidad Europea - 38 proyectos del FP6 y 25 del FP7 - y realizando diversas actividades de investigación y desarrollo para alcanzar sus objetivos principales: reducir el número

¹¹<http://cyberc3.sjtu.edu.cn/>

¹²<http://www.cybermove.org/>

¹³<http://www.netmobil.org/>

de fallecidos en las autovías y promover sistemas ecológicos para la conducción ¹⁴.

2.3.0.4. Consorcio Car2Car

Car2Car es un consorcio sin fines de lucro iniciado por los diversos fabricantes europeos de vehículos y apoyado por los proveedores de equipos y centros de investigación. El objetivo es incentivar el desarrollo de sistemas de comunicación inter-vehiculares para aplicaciones ITS que permitan incrementar la seguridad y la eficiencia en las carreteras. Por otra parte, *Car2Car* promueve la creación de un estándar europeo con el fin de facilitar una futura comunicación V2V entre las diversas marcas, incluyendo la asignación de una banda de frecuencia exclusiva y gratuita para aplicaciones *Car2Car* en toda Europa ¹⁵. Por esta razón el consorcio trabaja en cooperación con las organizaciones de estandarización europea e internacional, en particular con ETSI TC ITS ¹⁶.

2.4. Programa AUTOPIA

El programa AUTOPIA se desarrolla en el Centro de Automática y Robótica de la Universidad Politécnica de Madrid y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CAR, UPM-CSIC). Fue iniciado en el año 1997, y desde entonces ha centrado su trabajo en la aplicación de técnicas de control, desarrolladas primero para robots móviles, a vehículos autónomos reales. Estas técnicas de control están basadas principalmente en controladores borrosos, los cuales, con sencillas reglas, pueden emular el comportamiento humano en la conducción de vehículos. El objetivo final es lograr la conducción autónoma, y además, mejorar la seguridad, sobre todo en entornos urbanos.

Los primeros experimentos realizados fueron simulaciones. El objetivo era la obtención de modelos computacionales de conducción humana (García et al., 1997a). En estas simulaciones se implementó el co-procesador ORBEX (*Ordenador Borroso EXperimental*), el cual se describe en la sección 2.4.2. Entre los resultados obtenidos resaltan: el seguimiento de líneas, marcha en caravana, conducción en circuitos urbanos (curvas y rectas a diferente velocidad) y tráfico urbano (García et al., 1997b).

En el año 1998, fueron construidas las pistas de pruebas del programa: el ZOCO (*Zona de COnducción automática de vehículos*), en las instalaciones del CAR (antiguo Instituto de Automática Industrial -IAI-). Estas pistas permiten experimentar con vehículos reales en un entorno urbano. En la figura 2.8 se muestra el primer trazado del ZOCO.

Aunque el proceso de instrumentación de los vehículos se fue posterior, se realizaron diferentes simulaciones, utilizando el nuevo entorno de pruebas ZOCO (García y de Pedro, 1998). Para finales del año 1999 estaba instrumentado el primer vehículo, llamado *Babieca* (Reyes et al., 1999), una de las dos furgonetas Citroën eléctricas, adquiridas por el grupo. El control longitudinal se hizo utilizando una tarjeta ADC-DAC (desarrollada en el IAI), la cual cuenta los pulsos directamente desde el tacómetro del vehículo y da un voltaje de referencia (entre 1 y 4 voltios), que luego es enviado para establecer la velocidad de referencia para actuar en el acelerador y mover así el vehículo (Caballero y Montes, 2000).

Utilizando un motor de 90 vatios de potencia, conectado a través de engranajes a la dirección del vehículo, se implementó el control lateral en las furgonetas. Las tarjetas de control y potencia del motor, se comunicaban con el PC a través de un Bus ISA de 16 Mbit/s (Alcalde, 2000). Otro de los aciertos que logró el proyecto en sus principios

¹⁴<http://ec.europa.eu/information-society/activities/esafety/index-en.htm>

¹⁵<http://www.car-to-car.org/>

¹⁶<http://www.etsi.org/website/homepage.aspx>



Figura 2.8: ZOCO, en las instalaciones del CAR, UPM-CSIC

fue establecer un GPS diferencial de precisión (*Differential Global Position System*) como sensor principal del sistema (Reviejo et al., 2000). Para ello, fue necesario la instalación de una red inalámbrica (a través de tarjetas WiFi 802.11b) que permite establecer la comunicación entre la estación base y los vehículos en las pistas. Esta red luego serviría para monitorizar y comunicar los otros vehículos (Naranjo, 2000).

El grupo acumulaba experiencia, tanto a nivel de controladores borrosos, como en sistemas de navegación por satélite (GNSS) (González et al., 2002). Las diferentes estrategias que, en un principio fueron definidas en simulación, se probaron, sintonizaron e implementaron en vehículos reales (García y de Pedro, 2000; de Pedro et al., 2001).

Con la primera furgoneta instrumentada, se planteó un nuevo sistema de navegación, utilizando un GPS y una cámara de visión artificial (Alcalde et al., 2001). En este punto del proyecto, se efectuó el seguimiento de carreteras no estructuradas (sin líneas pintadas), y la detección de vehículos, circulando en el mismo entorno de trabajo (Sotelo, 2001).

En el año 2002, fue instrumentado el segundo prototipo (*Rocinante*). Utilizando un nuevo PC industrial (Figura 2.9), y las mismas tarjetas para el control de motores (con bus ISA), se procedió también a la instrumentación del freno, utilizando un motor DC unido al pedal a través de un cable de acero (Naranjo et al., 2003a). Este mismo año el grupo recibió el premio a la investigación en el campo de la automoción, otorgado por la fundación Eduardo Barreiros. Inmediatamente, en el IV simposio internacional de vehículos inteligentes (García et al., 2002), tuvo lugar la primera demostración internacional del grupo, en Versalles- Francia. En la sección 2.4.1 se describen todos los vehículos con los que cuenta el programa AUTOPIA.

Con dos vehículos instrumentados, se realizaron diferentes maniobras cooperativas. En ellas, *Rocinante* era utilizado en modo autónomo, mientras que *Babieca* se conducía en modo manual. Un resumen de las maniobras realizadas hasta ese momento se encuentra en (Naranjo, 2005), siendo las más relevantes el adelantamiento entre dos vehículos y el ACC (Naranjo et al., 2003b, 2006b). Para las comunicaciones entre los vehículos se instaló una red inalámbrica, a través del protocolo TCP-IP, con comunicaciones punto a punto. La maniobra de ACC fue además implementada utilizando otros sensores: laser frontal y cámaras de visión, en (Sotelo et al., 2004b) y (Sotelo et al., 2004a) respectivamente. Todos los experimentos relacionados con visión, han sido realizados, en esta etapa y en futuros proyectos, en colaboración con el grupo *Robesafe*, del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá de Henares.



Figura 2.9: PC industrial embarcado en *Rocinante*

En 2005 se realizaron varias simulaciones para ajustar los parámetros de control de los controladores borrosos, sobre todo optimizando la energía y redefiniendo las funciones de pertenencia con algoritmos genéticos (Alonso et al., 2005). Además, utilizando estrategias evolutivas, se definieron nuevas maneras para estimar los mapas, llegando a un número eficiente de puntos en la generación de trayectorias (Serrano et al., 2005).

En este mismo año, se instrumentó el primer vehículo a gasolina del grupo: *Clavileño*, un Citroën C3 pluriel descapotable (Figura 2.11, sección 2.4.1). El sistema de actuación sobre el volante es quizás la diferencia más grande, en relación al instalado en las furgonetas hasta ese momento. Se utilizó el motor de la dirección asistida para mover el volante. Para ello, se instaló una nueva etapa de potencia (capaz de suministrar los 60 amperios que demanda el motor), controlada directamente desde el PC central, a través de un PWM (Naranjo et al., 2006a). La acción sobre el acelerador se hizo de forma análoga a la de sus predecesores, utilizando una tarjeta digital analógica. La acción sobre el freno de este vehículo se realizó años más tarde, y se explica con detalle en (Milanés, 2010).

El año 2006, fue de gran proyección internacional para el grupo, ya que se lidera uno de los paquetes de trabajo del proyecto Cybercars 2 (sección 2.3.0.2). Los objetivos planteados en el proyecto fueron superados por el grupo AUTOPÍA, según se notó en las diferentes presentaciones hechas en Versailles y La Rochelle (Francia), en el año 2008 (Molinet et al., 2009). En la figura 2.10 se muestra la exhibición final del proyecto, juntos con los equipos de TNO (Holanda) y el INRIA (Francia).

En *Clavileño* se instaló un sistema de visión con cámaras estereoscópica para la detección de peatones. Este sistema permite identificar cuando un peatón se interpone en el recorrido del coche. Un buen resumen de los logros, hasta entonces, alcanzados por el proyecto AUTOPÍA, se encuentran en González (González et al., 2006).

Con tres vehículos instrumentados, los objetivos del grupo se derivaron más a la cooperación entre vehículos, sobre todo en maniobras de riesgo, como: cruces, adelantamientos y caravanas con ACC, utilizando dos o más coches. En simulación, se realizaron estudios



Figura 2.10: Exhibición final del proyecto Cybercas II, en la Rochelle

para la maniobra de adelantamiento, considerando tres vehículos en una carretera de dos vías (un solo carril en cada sentido) (Alonso et al., 2007). En las furgonetas se realizaron pruebas con intersecciones, permitiendo establecer prioridades en el cruce y cediendo el paso, según fuera el caso. La toma de decisiones para cooperación entre vehículos, sus implementaciones, simulaciones y perspectivas para el futuro, se explican claramente en (de Pedro et al., 2007).

En 2008, un nuevo sistema de posicionamiento fue instalado en *Clavileño*, utilizando una unidad de medición inercial (IMU). Con este nuevo sistema de posicionamiento y frenado se han desarrollado muchas aplicaciones para el control longitudinal: El control ACC aplicado para vehículos urbanos (baja velocidad), frenadas de emergencia, evitación de peatones y vehículos, son algunas de las nuevas prestaciones de este nuevo sistema (Milanés, 2010). Además, en (Onieva et al., 2010) se presenta un control de cruce para entornos urbanos basado en los nuevos actuadores instalados en el vehículo con motor a gasolina.

Por otra parte, un ajuste del control lateral de posición del vehículo ha sido simulado, calibrado y probado en *Clavileño*. Este ajuste se hizo reproduciendo actitudes de un conductor humano en diferentes situaciones. Primero se procedió a la captura de los datos de la posición angular del volante y demás parámetros, para así hacer un ajuste genético, entrenando dos redes neuronales en paralelo, considerando las reglas y las entradas tomadas. Los resultados muestran un control más eficiente de la posición del volante (Onieva, 2011).

En 2009 comenzó la instrumentación de *Platero*, el otro Citroën C3, el cual, hasta entonces, había sido utilizado para transmitir datos de posición y velocidad en maniobras cooperativas (Godoy, 2008).

Dentro del proyecto GUIADE, se ha adquirido un autobús eléctrico de 14 plazas, para su automatización y guiado. Conjuntamente, se ha construido una nueva estación central para la mejora de la comunicación entre vehículos y con la infraestructura (Godoy et al., 2010), así como una rotonda con cuatro entradas/salidas en el ZOCO.

En la presente tesis se pretende describir el diseño, la implementación y el ajuste de los nuevos controladores de los vehículos del programa AUTOPIA. Así se describe un nuevo sistema de control lateral en cascada para entornos urbanos (capítulo 3), y las ventajas



Figura 2.11: Vehículos del programa AUTOPÍA: *Rocinante*, *Babieca*, *Platero*, *Clavileño*, y *Molinero*

del control neuro-borroso para los actuadores longitudinales (capítulo 4). Basándonos en estas experiencias, en el capítulo 5, se describen las últimas maniobras, tanto cooperativas como individuales, en entornos urbanos: adelantamientos considerando vehículos en sentido opuesto, control de cruce utilizando sensores inteligentes en la infraestructura (RFID), el movimiento en marcha atrás y el control en rotondas.

Finalmente, los nuevos objetivos dentro del programa AUTOPÍA apuntan a la conducción autónoma a mayor velocidad y en escenarios reales. Es por ello que en las secciones 5.6 y 5.7 se describen los últimos desarrollos alcanzados en esta área: control lateral a altas velocidades y nuestra participación en el GCDC, respectivamente.

2.4.1. La flota de vehículos

Actualmente, el programa AUTOPÍA cuenta con una flota de cinco vehículos, los cuales se describen a continuación:

- **Las furgonetas:** son dos Citroën Berlingo de propulsión eléctrica que fueron adquiridas durante la ejecución de los proyectos COVAN y GLOBO; ambos financiados por la CICYT. Son los primeros vehículos instrumentados en el programa AUTOPÍA. Son conocidos por sus nombres: *Babieca* y *Rocinante* (figura 2.11, parte superior derecha), y cuentan con un motor eléctrico de 15KW que les permite alcanzar velocidades de hasta 90 km/h. Además, poseen dirección hidráulica, un sistema de frenos convencional y un acelerador que funciona como un potenciómetro, y donde se controla la velocidad (sección 3.4.2). En (Pérez et al., 2009) se describen las últimas mejoras y actualizaciones hechas en las furgonetas, con el objetivo de implementar el sistema de control lateral en cascada del capítulo 3 de esta tesis.
- **Los vehículos a gasolina:** El Programa posee además dos vehículos Citroën C3 con motor a gasolina. El primero de ellos, denominado *Clavileño* (figura 2.11, parte inferior derecha), es un modelo Pluriel (descapotable) que ha sido totalmente automatizado, tomando como referencia los dos primeros vehículos. *Clavileño*, además de

contribuir a la investigación dentro del Programa AUTOPIA, ha servido como banco de pruebas para algunos sistemas de control y prevención desarrollados por otros grupos y proyectos de investigación (Fernandez Llorca et al., 2011; Molinete et al., 2009). En el capítulo 4 y en la sección 5.6 del capítulo 5 se ha utilizado a *Clavileño* como plataforma de pruebas de los experimentos.

El segundo coche, conocido como *Platero*, ha sido utilizado como plataforma de apoyo en maniobras cooperativas, ya que solo contaba con un DGPS, un ordenador portátil y una antena para las comunicaciones (Godoy, 2008) (figura 2.11, parte superior izquierda). Estas modificaciones permitían conocer su posición y velocidad al resto de los vehículos del entorno. En (Godoy, 2011) se describen las últimas actualizaciones hechas para su automatización. Este vehículo ha sido utilizado por el equipo AUTOPIA en la primera edición del GCDC 2011 (sección 5.7, de esta tesis).

- **Autobús eléctrico:** el programa AUTOPIA ha adquirido recientemente un minibús eléctrico fabricado por la empresa española ConMasAuto con la finalidad de extrapolar las técnicas de conducción autónoma a los servicios de transporte público. Este vehículo, denominado *Molinero* (figura 2.11, parte inferior izquierda) se encuentra actualmente en la primera fase de automatización, y es el único de los vehículos del programa que no ha sido utilizado en la presente tesis.

2.4.2. ORBEX

Un controlador borroso (o controlador difuso, *Fuzzy Logic Controller*, (de Pedro T., 2007) está compuesto por un conjunto de reglas lingüísticas que tienen como antecedentes los valores posibles de las entradas, y que concluyen la acción a efectuar en términos también lingüísticos, o que permite escribir las reglas en un lenguaje casi natural.

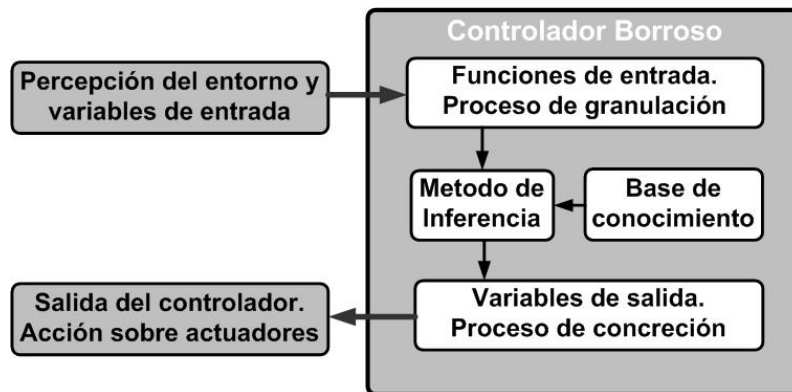


Figura 2.12: Esquema de funcionamiento de un controlador borroso

En la figura 2.12 se muestran las diferentes partes, así como la secuencia de ejecución, de un controlador borroso. En la parte central de la figura 2.12 se puede apreciar el bloque donde se encuentra almacenado el conjunto de reglas, basadas en la experiencia de expertos. En nuestro caso, la base de reglas se basa en las acciones que debe hacer un buen conductor. Finalmente, en el proceso de concreción se obtiene el valor de las variables de salida, para luego actuar sobre proceso deseado.

El sistema ORBEX (acrónimo en español de *Ordenador Borroso Experimental*) (García et al., 1997a,b) es un motor de inferencia borroso que ha sido utilizado por el grupo AUTOPIA para varios proyectos, incluido el control en tiempo real de los vehículos. ORBEX

permite describir de forma sencilla las diferentes partes del controlador: las funciones de pertenencia, las reglas y el proceso de inferencia en la salida. Así pueden definirse las diferentes estrategias de conducción para adaptarse al entorno mediante reglas difusas del tipo SI...ENTONCES... El controlador permite imitar el comportamiento humano en la conducción de vehículos. ORBEX trabaja con consecuentes del tipo singleton, lo que permite tomar decisiones de control en un período de tiempo muy corto y con muy buena precisión, cualidad más que deseable para sistemas de tiempo real, donde el tiempo de inferencia es un aspecto vital.

Todo controlador borroso se divide en tres etapas: establecimiento de particiones borrosas, inferencia y concreción (figura 2.12). Para el diseño de un controlador con ORBEX es necesario especificar tres secciones fundamentales:

1. Las variables de entrada al sistema con sus respectivas particiones borrosas o etiquetas lingüísticas. Esta sección se inicia con la cadena Entradas, seguida de las definiciones de las variables de entrada. La definición de variables de entrada es de la forma siguiente, donde (A,B,C,D) definen una función de pertenencia trapezoidal:

```
Entrada1 Etiqueta11 A11 B11 C11 D11 Etiqueta12 A12 B12 C12 D12...
Entrada2 Etiqueta21 A21 B21 C21 D21 Etiqueta22 A22 B22 C22 D22...
```

El proceso de granulación consiste en la asignación de un peso específico (W_i) para cada etiqueta lingüística, con respecto a cada función de pertenencia de entrada con que esté asociada. Este peso W_i será utilizado en el proceso de concreción según la agrupación que se indique en la base de reglas.

2. Las variables de salida del sistema con sus respectivas particiones (singleton). Esta sección se inicia con la cadena Salidas, seguida de las definiciones de las variables de salida, que son muy similares a las entradas, salvo que un único valor basta para definir la posición del singleton:

```
Salida1 Etiqueta11 A11 Etiqueta12 A12...
Salida2 Etiqueta21 A21 Etiqueta22 A22...
```

3. Un conjunto de reglas de inferencia que se combinan para dar un valor a las variables de salida. Esta sección tiene la particularidad de que permite escribir e identificar varios juegos excluyentes de reglas que llamamos contextos. Cada contexto se inicia con la palabra Reglas seguida del nombre del contexto. Para describir las reglas, ORBEX tiene una sintaxis muy potente y flexible que permite el uso de modificadores. Las reglas son del tipo:

```
SI Entrada1 Valor1 Y Entrada2 Valor2 ENTONCES Salida1 Etiqueta1.
```

```
SI Entrada2 Valor3 MENORQUE Valor ENTONCES Salida2 Etiqueta2.
```

El método de concreción utilizado por ORBEX es del centro de masas (ecuación 2.1). O_i representan los valores de los singleton asignados para cada etiqueta lingüística. Esta

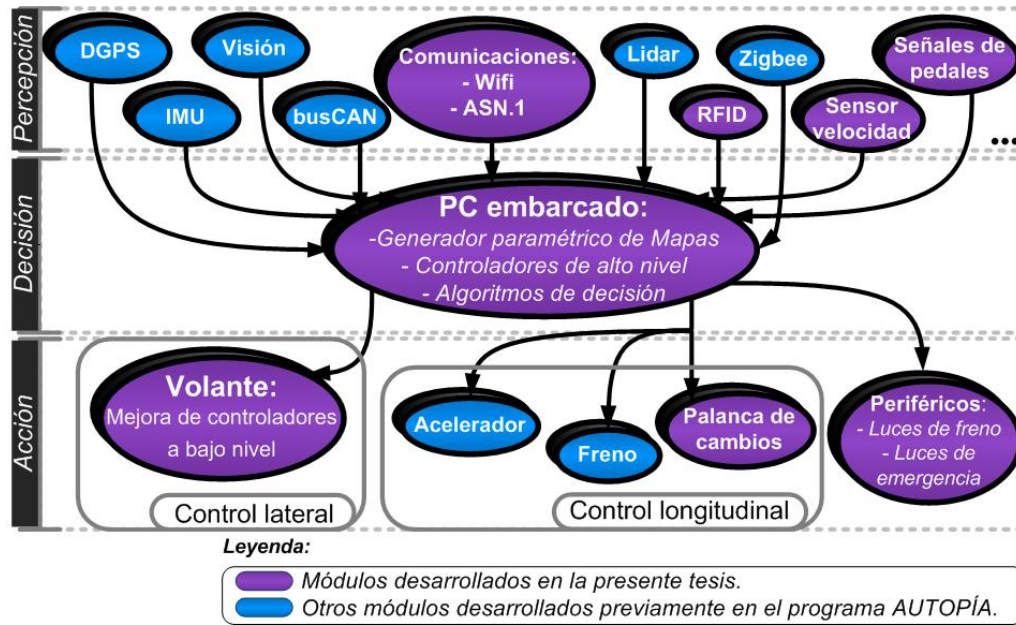


Figura 2.13: Arquitectura de control del programa Autopia

fórmula está implementada para cada variable de salida dependiente de cada etiqueta lingüística.

$$X_i = \sum \frac{W_i O_i}{W_i} \quad (2.1)$$

2.4.3. Arquitectura para vehículos autónomos

Para el control autónomo de vehículos existen tres etapas bien definidas en la literatura: percepción, decisión y actuación (Naranjo, 2005). Otros autores (Milanés, 2010) han dividido la etapa de decisión en: gestión, coordinación y planificación. Éstas pretenden separar los problemas de procesamiento de la información sensorial, de control en maniobras cooperativas y de definición de las rutas óptimas, respectivamente, con el objetivo de disminuir los posibles conflictos entre tareas.

Tomando como premisa los trabajos previos desarrollados a lo largo de estos años en el programa AUTOPIA, se va a usar la arquitectura de control mostrada en la figura 2.13, donde pueden apreciarse los diferentes módulos desarrollados en esta tesis, y los que han sido desarrollados en trabajos previos (Naranjo, 2005; Milanés, 2010; Onieva, 2011). Esta arquitectura es análoga para todos vehículos utilizados en esta tesis. Solo varía en la inclusión de ciertos sensores, sintonización de controladores y los actuadores utilizados para controlarlos. A continuación se explica cada una de estas etapas:

- La etapa de **percepción**: es la encargada de recibir la información proveniente del entorno a través de diferentes sensores y comunicaciones. En esta etapa se leen las tramas del sensor principal: el DGPS. Además, se puede utilizar la posición obtenida de la unidad inercial (IMU) cuando la señal del DGPS falla (Milanés et al., 2008). En algunos vehículos se han instalado cámaras de visión o lidars para la detección de obstáculos, otros vehículos, señales de tráfico y peatones (Sotelo et al., 2004b,a; Fernandez Llorca et al., 2011). El bus CAN del vehículo se utiliza para leer la velocidad y la aceleración (en los vehículos a gasolina), y en algunos casos la posición del

volante. Las comunicaciones utilizadas están basadas en el estándar de comunicación IEEE 802.11b/g, aunque pueden utilizar otros con el ASN.1 (descrito en la sección 5.7.3). Otros sensores utilizados en los vehículos han sido los Zigbee (Milanés et al., 2010c) y los RFID (Pérez et al., 2010b) para la comunicación con señales de tráfico y situaciones de riesgo. Finalmente, y como parte de los requisitos para participar en el GCDC (sección 5.7) se han habilitado las entradas de los módulos analógicos para poder detectar, a través de los sensores de fabrica del vehículo, la posición de los pedales de acelerador y freno (Pérez y Milanés, (In Press)).

- La etapa de ***decisión***: es el corazón del sistema de control embarcado en los vehículos. En ella se definen, además de la gestión, coordinación y planificación presentadas en (Milanés, 2010), la nueva generación de mapas a través de curvas paramétricas (sección 5.5), los controladores de alto nivel de cada uno de los vehículos y los algoritmos de decisión definidos en función de la maniobra que se encuentre realizando el vehículo (según la sub-etapa de coordinación), que se describen a lo largo de esta tesis.
- La etapa de ***acción***: está dividida en los sub-etapas: control lateral y longitudinal. La primera describe en sistema de actuación para la dirección, mientras en la segunda se encarga de actuar sobre los pedales del vehículo. Esta etapa define los valores de salida para cada uno de estos actuadores, y que se llevan a cada módulo externo de control. Como parte de las aportaciones de la presente tesis, se han mejorado los actuadores de bajo nivel en la dirección de las furgonetas. Además se ha incluido el control de dos nuevos dispositivos: la palanca de cambios y algunos periféricos -luces de freno y de emergencia- (sección 5.4.2 y 5.7.2, respectivamente).

Capítulo 3

Control lateral en cascada para vehículos autónomos

La sencillez abre paso a la innovación

El autor - discutiendo con Vicente y Jorge -

3.1. Introducción

Hasta la fecha, los sistemas de ayuda a la conducción desarrollados en el sector de la automoción se centran especialmente en el control de velocidad del vehículo. Así, podemos encontrar en el mercado sistemas para seguir una velocidad prefijada (van Arem et al., 2006), disminuir la velocidad del vehículo ante un peatón (Llorca, 2008) o seguir a un vehículo líder a una distancia predeterminada (Pauwelussen y Feenstra, 2010). Sin embargo, sistemas que involucren el control (ya sea parcial o total) sobre la dirección del vehículo se encuentran todavía en fase preliminar. Como principales avances, cabe citar los sistemas de aviso de abandono de carril, que advierten al conductor sobre una conducción inadecuada. La investigación en sistemas capaces de ayudar al conductor mediante un control adecuado de la dirección es de crucial importancia para complementar los avances logrados hasta la fecha sobre el control longitudinal de vehículos.

Este capítulo está centrado en el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de control lateral en cascada para vehículos autónomos. Éste se divide en dos niveles: un lazo interno de control que permite ejecutar las consignas de posición y velocidad, estabilizando la acción sobre el volante, y un segundo lazo externo de control (gobernado por un controlador borroso) que envía las consignas de giro según las condiciones del entorno y el vehículo. El sistema de control propuesto se ha probado en dos etapas: una primera como asistente en curvas donde el sistema es capaz de detectar comportamientos inadecuados por parte del conductor y corregir su trayectoria (Pérez et al., 2011c), y una segunda donde se ha probado el control automático del volante tanto en tramos rectos como curvos (Pérez et al., 2011d). Diferentes experimentos se han llevado a cabo en curvas de distinto radio y a diferentes velocidades (dentro de entornos urbanos).

3.2. Planteamiento del problema

Las investigaciones realizadas dentro de los sistemas ITS están encaminadas a la mejora de la seguridad y el confort en la conducción de vehículos. Diferentes maniobras han sido

desarrolladas e implementadas en vehículos comerciales. Entre ellas: Control Crucero (CC) (van Arem et al., 2006), sistemas de frenado ABS (Lin y Ting, 2007), sistemas que actúan de forma autónoma sobre el vehículo (Hsu et al., 2008), sistemas de aviso de ángulo muerto (OMalley et al., 2011), entre otras. La mayoría de estas aplicaciones están enfocadas al control longitudinal (acción sobre el freno y el acelerador). Aunque algunas, a muy baja velocidad, toman el control del volante como: el aparcamiento asistido (Totzke et al., 2011), y los sistemas de dirección asistida (EPS o EPAS) (Yoon et al., 2009), los cuales solo toman el control parcial del volante para avisar al conductor sobre situaciones de peligro.

La escasa implantación comercial del control lateral se debe, en parte, a las fatales consecuencias que implican cambios bruscos en el volante (a veces giros de pocos grados pueden hacer que el vehículo vuelque). Aunque, la implementación de un sistema capaz de controlar de forma precisa el volante se antoja fundamental para el desarrollo de los vehículos autónomos, este sistema no puede limitarse solo al control de posición sobre el volante (Hayakawa et al., 2004; Naranjo et al., 2005), también es necesario un control estable y seguro, que considere la velocidad angular del volante como parámetro de control. En este sentido, la propuesta que se hace en la presente tesis es presentar una arquitectura de control que permita utilizar dos variables dentro del lazo de control que gobierna la dirección del vehículo, valiéndose para ello de la posición y la velocidad angular del volante.

El propósito de este capítulo es desarrollar una nueva arquitectura de control del volante que mejore los resultados previos obtenidos en (Naranjo, 2005; Onieva, 2011). Para ello se ha considerado la inclusión de la velocidad giro del volante como parámetro dentro del lazo, así como variables que, hasta ahora, estaban relacionadas con el control longitudinal. Como se ha descrito en el capítulo 2 y en (Naranjo, 2005), así como en otros trabajos dentro del área de investigación a nivel mundial, sólo se ha considerado un parámetro de control basado en la posición del volante, sin tomar en cuenta la velocidad del vehículo. Aunque los resultados de este tipo de control son aceptables, en muchos casos, el volante oscila, sobre todo en tramos curvos. El objetivo de esta nueva arquitectura es aumentar el número de los parámetros de control, incluyendo la velocidad longitudinal del vehículo y la distancia hasta la próxima curva como nuevas variables de entrada, manteniendo además la simplicidad dentro de la estructura general del sistema.

Poder manipular la velocidad de giro del volante se presenta como una ventaja notable, que hace que la estrategia de control se aproxime más a la de un conductor humano, que considera ambas salidas, posición y velocidad angular, haciendo el sistema más seguro y evitando giros bruscos, que luego puedan acabar en accidentes fatales.

Para realizar un buen control de velocidad y posición, en un sistema de control en cascada, es necesaria una buena definición de cada uno de los parámetros asociados a cada etapa del sistema de control. En este capítulo se explican los diferentes pasos que se han llevado a cabo en la definición de cada uno de estos parámetros dentro del esquema de control en cascada, fusionando técnicas de control clásico con control inteligente. Los resultados obtenidos demuestran el buen funcionamiento del sistema en una de las furgonetas eléctricas (*Babieca*) del programa AUTOPÍA, logrando tomar las curvas a una velocidad mayor y de forma más confortable, estable y segura.

3.3. Ámbito y trabajos previos

La automatización y el control de vehículos, con el paso del tiempo, se está convirtiendo en una realidad cada vez más patente. Diferentes aplicaciones que antes existían sólo a nivel teórico pasan rápidamente a implementarse en vehículos comerciales (Vaa et al., 2007). El control lateral en vehículos reales es un reto que llevan afrontando diferentes grupos de

investigación y fabricantes desde hace poco menos de medio siglo (Shladover, 1995).

Uno de los primeros desarrollos en el campo de los sistemas avanzados para el control de vehículos (AVCS) tuvo lugar a principio de los sesenta, en el departamento de investigación de *General Motors*. Ellos habían desarrollado sistemas de control que actuaban sobre el volante, acelerador y freno de sus automóviles en circuitos privados (Gardels, 1960), pero estos experimentos nunca llegaron a comercializarse, quizás porque la electrónica analógica de la época nunca permitió un control refinado y robusto (el control lateral presentaba muchas oscilaciones). Posteriormente, otros grupos de investigación empezaron a mejorar el control lateral y longitudinal de vehículos autónomos, como la universidad del estado de Ohio y el Instituto Tecnológico de Massachusetts - MIT -, que empezaron a trabajar en la aplicación de diferentes técnicas de control para los problemas urbanos de transporte (Barrick, 1962). Estos avances provocaron la creación del primer gran consorcio en automoción de transporte público, el proyecto METRAN (Hanson, 1966).

Uno de los trabajos pioneros en la mejora del modelado y control lateral en vehículos fue (Ackermann et al., 1999). Su principal aportación, además del famoso modelo de bicicleta de Ackerman (Khan y Spenko, 2009; Sotelo, 2003), ha sido fusionar la dirección activa con la retroalimentación de velocidad de guiñada (*yaw*), para así poder desacoplar con estabilidad la orientación y las oscilaciones laterales (Ackermann et al., 1999). Otro método muy utilizado para la ejecución del control lateral está basado en el seguimiento de trayectoria de referencia predefinidas (Unsal et al., 1995).

Diferentes técnicas permiten un control más rápido, suave y de altas prestaciones, de sistemas con una dinámica no lineal, como es el caso de la dirección de un vehículo real. Algunas de las técnicas utilizadas para el seguimiento de trayectoria en vehículos automáticos incluyen: lógica borrosa (Sugeno y Nishida, 1985), optimización desigual de matrices lineales (v.g. quitanieves automatizados) (Tan et al., 2007), y control de guiñada (White y Tomizuka, 2001).

Otros autores, como Choi (Choi, 2000) han desarrollado un sistema de control para vehículos automáticos, utilizando marcas magnéticas colocadas en el suelo, y considerando leyes de control adaptativo que permiten reducir el error a la referencia. En una línea de trabajo paralela, el centro de investigaciones de Nissan ha logrado avances significativos en el control de sus vehículos, utilizando un control realimentado por cancelación de error, el cual permite estimar la posición de referencia siguiente, y así, generar el ángulo de giro del volante (Hayakawa et al., 2004).

Recientemente, la mejora en la fabricación de controladores y dispositivos electrónicos permite que este tipo de control de mejores resultados. En esta línea, el sistema de control del volante debe ser capaz de mantener la orientación del vehículo sobre un trayecto predefinido, haciendo que el control sea lo más estable posible. Gracias al gran número de métodos y aportaciones que se han realizado en el seguimiento de trayectorias, además de las que ya existen para robots móviles, éste problema se considera solventado (Ackermann et al., 1999; Choi, 2000; Hayakawa et al., 2004; Naranjo et al., 2005). Por este motivo, hoy en día, los esfuerzos se centran en hacer el control más confortable y fiable.

En este sentido, un gran avance en el control lateral de vehículos modernos es el uso de los sistemas eléctricos de dirección asistida - EPS - (*Electric Power-Assisted Steering*), reemplazando a los clásicos sistemas hidráulicos - HPS - (*Hydraulic Power Steering*). Varias simulaciones con estos nuevos sistemas se presentan en (Cheng et al., 2007; Chen et al., 2008). Guvenc y Guvenc (Guvenc y Guvenc, 2002) han presentado una estructura con un doble controlador que permite gobernar sistemas EPS genéricos, contemplando el par del motor y la inercia de la dirección.

Yih y Gerdes (Yih y Gerdes, 2005), de la Universidad de Stanford, han modificado

un vehículo comercial, con el fin de utilizar un sistema de control de dirección por cable, cerrando el lazo de control mediante posicionamiento GPS. Asimismo, han utilizado el modelo de la bicicleta de Ackermann (Ackermann et al., 1999) y una estimación real de la dinámica para cancelar el error en el control del volante ocasionado por la dinámica del sistema y la interacción del neumático con el suelo. Otras aplicaciones en sistemas automatizados en carreteras - AHS - (*Automated Highway Systems*) consideran el control lateral de vehículos pesados (Tai et al., 2004). En esta aproximación, se incluye un bucle interno de control en la arquitectura de control de vehículos automáticos.

En el mundo del control existe una brecha entre el control de sistemas dinámicos simulados y la implementación de estos controladores en sistemas reales. Esta brecha se está reduciendo gradualmente, gracias a los avances que se han alcanzado en diferentes simuladores (Bauml et al., 2007; Cardamone et al., 2009; Glaser et al., 2010). Sin embargo, éstos son totalmente dependientes de la complejidad y de las diferentes restricciones impuestas por cada sistema.

Por este motivo, el control inteligente es una buena alternativa para la automatización de sistemas complejos, en este caso, vehículos reales. En (Precupa y Hellendoornb, 2011) se describen algunas de las aplicaciones que los controladores inteligentes, específicamente borrosos, han tenido en el mundo industrial, basándose en el conocimiento de expertos. Al mismo tiempo, Takagi y Sugeno (Takagi y Sugeno, 1985), utilizando lógica borrosa, lograron realizar un buen control en robots móviles (Sugeno y Nishida, 1985). Por lo tanto, el problema quedó entonces reducido a establecer un conjunto de reglas de control y sintonizarlas en función de la experiencia humana. En (Naranjo, 2005; Onieva, 2011) se muestran aplicaciones de esta técnica usando como base de conocimiento la experiencia humana en la conducción.

Por otra parte, algunos estudios han comparado el desempeño de sistemas inteligentes y clásicos de control aplicados a vehículos autónomos (Chaib et al., 2004), encontrando mejoras considerables usando el control borroso. Sin embargo, muchas aplicaciones demuestran que un controlador PID (de Proporcional-Integral-Derivativo) puede ser la mejor alternativa en cambios de referencia, rapidez y estabilidad en sistemas de gran complejidad (Ogata, 1998). El presente capítulo pretende mostrar las ventajas de fusionar ambas técnicas para el control lateral en vehículos reales.

Los experimentos que serán descritos en este capítulo han sido realizados en una de las furgonetas eléctricas del programa AUTOPÍA (*Babieca*), implementando un nuevo sistema de control para la dirección en vehículos autónomos. El trabajo presentado es la continuación de (Naranjo et al., 2005), sin embargo las mejoras obtenidas son considerables. En resumen:

- La etapa de potencia, basada en un bus ISA (*Industry Standard Architecture*) ha sido reemplazada por una de etapa de potencia de nueva generación que se conecta al ordenador de a bordo, a través de una conexión Ethernet. Éste dispositivo, que cuenta con un controlador PID discreto embebido, ha permitido reducir los retrasos en comunicación, disminuyendo el tiempo de respuesta del sistema (Pérez et al., 2009). Además, un nuevo motor, base de montaje y relación engranajes ha sido instalada (Milanés et al., 2010e).
- El sistema de control propuesto introduce nuevos parámetros de control (v.g. la velocidad angular) que no habían sido considerados en trabajos previos (Naranjo et al., 2005; Onieva, 2011), con el objetivo de mejorar la estabilidad y el confort en el control, manteniendo la intuición del controlador propuesto.

- Para mantener esta intuición, han sido tenidos en cuenta dos nuevos parámetros de control, v.g., la velocidad actual y distancia a la próxima curva, permitiendo que el sistema sea *multivariable*, combinando variables asociadas, tradicionalmente, al control longitudinal en el control lateral.
- En trabajos previos (García et al., 2002; Naranjo et al., 2005; Onieva, 2011), la velocidad para curvas pronunciadas estaba fijada a 8 km/h para mantener el vehículo dentro de la vía. El sistema propuesto no tiene limitaciones de velocidad para mantener la trayectoria en el carril de circulación. Basados en la experiencia de conductores humanos, las curvas de más 90° han podido ser tomadas hasta los 24 km/h.
- Finalmente, ha sido desarrollado un único controlador borroso capaz de conducir en tramos rectos y curvos, sustituyendo los dos controladores previos (Naranjo, 2005; Naranjo et al., 2005; Onieva, 2011) desarrollados para cada tipo de tramo. El sistema de control propuesto, al eliminar la necesidad de dos controladores (uno para curvas y otro para rectas en entornos urbanos) aumenta la robustez del sistema de control.

Considerando las mejoras descritas, el objeto del presente capítulo es introducir un sistema de control en cascada para el control lateral en vehículos autónomos. Dicho sistema estará formado por un controlador PID en el bajo nivel, cuya misión será estabilizar las acciones de control generadas por el controlador borroso de alto nivel. Así pues, el sistema propuesto mejora el control de manera significativa respecto a trabajos previos, estabilizando la acción sobre el volante, manteniendo el confort y permitiendo incrementar la velocidad de conducción.

En el siguiente apartado, se mencionan y explican cada una de las partes que forman el sistema, los requisitos de diseño y el control en cascada propuesto. Más adelante, se explicarán el controlador PID y el controlador borroso utilizados. En la sección de experimentos se describen las pruebas, a diferentes velocidades y con curvas de diferentes radios realizadas. Finalmente, se presenta una discusión sobre los resultados obtenidos y las posibles mejoras a realizar en trabajos futuros.

3.4. Descripción del sistema

El vehículo utilizado para validar el sistema de control propuesto en este capítulo es la furgoneta eléctrica: *Babieca*. En el capítulo anterior, figura 2.13, se presentó la arquitectura general de control para vehículos autónomos del programa AUTOPÍA. A continuación se describen las mejoras hechas en el control del volante, es decir, el control lateral.

En el esquema de control presentado en la figura 3.1 se especifican los periféricos utilizados en la percepción del entorno. Como puede apreciarse el control longitudinal está separado del lateral. El control longitudinal se supone solucionado. Teniendo en cuenta que el objetivo es mejorar la acción del volante en todo tipo de trazados, se ha utilizado el sistema de control de velocidad previamente desarrollado (Naranjo et al., 2006b). Para controlar el acelerador se ha utilizado una tarjeta analógica (Naranjo et al., 2006b), la cual recibe la consigna a través del puerto serie del ordenador de a bordo. Para el control del freno se ha instalado una bomba hidráulica (Milanés et al., 2010a). La arquitectura ha sido adaptada, incrementando su modularidad y permitiendo la inclusión de nuevos sensores (Pérez et al., 2009) como RFIDs, IMU, sensores de efecto Hall (para el cálculo de la velocidad), entre otros (Pérez et al., 2010b).

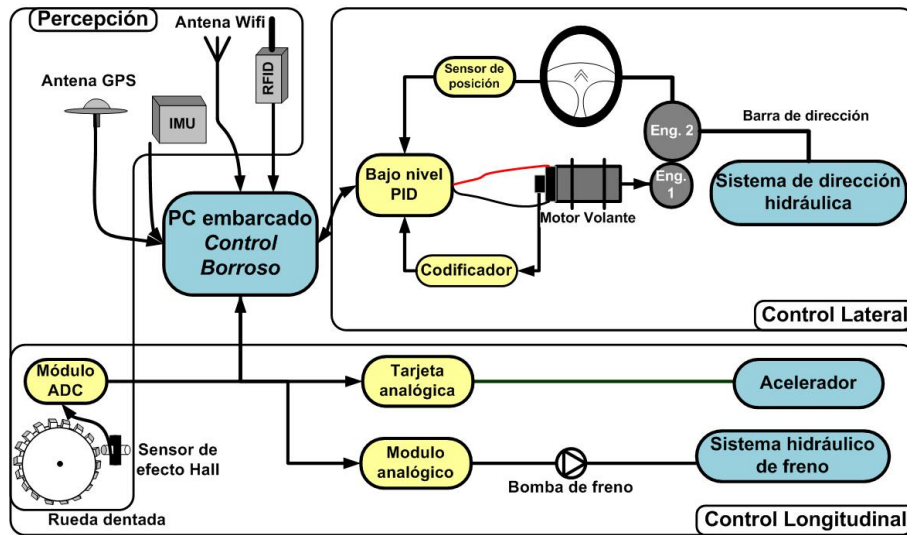


Figura 3.1: Esquema de control de la furgoneta *Babieca*

3.4.1. Mejoras en el hardware del control lateral

La arquitectura para el control lateral que se presenta en este capítulo es tipo maestro-esclavo, donde el maestro (o alto nivel) es un controlador borroso, que envía las consignas de posición y velocidad al bajo nivel, que en nuestro caso es un PID comercial. Éste ejecuta las consignas recibidas desde el control borroso, que se calculan a su vez en el ordenador embarcado en el vehículo.

El controlador de bajo nivel cuenta con diferentes formas de funcionamiento, los cuales permiten realizar diferentes modos de control. Además, éste cuenta con una interfaz sencilla de comunicación a través de un puerto Ethernet con el programa de control principal (FMo, 2007). Dentro del lazo de control del volante el modo utilizado es el de posición y velocidad.

El modelo del controlador es Fmod-IPECMOT 48/10 fabricado por la empresa Five-Co¹. Este dispositivo utiliza un controlador PID discreto para motores DC con escobilla o motores DC sin escobilla de 3 fases con sensores de campo. Éste dispositivo se comunica a través del protocolo TCP/IP-HTTP, que permite una fácil interacción con otros sistemas de control.

En la figura 3.2 se muestra el motor utilizado (con la pieza de acople, codificador y reductor), los engranajes instalados (entre el motor y la barra de dirección) y el controlador descrito. El controlador tiene capacidad de manejar motores de hasta 150 vatios, y la etapa de potencia está incluida dentro del mismo dispositivo.

La relación entre los engranajes de la barra de dirección y el motor ha sido diseñada con el fin de aumentar la velocidad de giro del volante y disminuir el par en el motor, cumpliendo los requisitos mínimos para girar el volante aún cuando el vehículo se encuentre detenido, es decir, con mayor adhesión al suelo. Los cálculos se explican a continuación.

La implementación de un control de posición y velocidad para la dirección de un vehículo autónomo debe realizarse estimando las condiciones a las que está sujeto el sistema. Para ello y como requisito de diseño, hemos establecido que el volante debe girar a una velocidad máxima de 180 grados/segundo (30rpm). En otras palabras, el giro completo desde el extremo izquierdo al extremo derecho del volante se realizará en 6 segundos, (entre -540

¹www.fiveco.ch



Figura 3.2: Motor, relación de engranajes y controlador

grados y +540 grados).

Las furgonetas tienen un sistema hidráulico HPS para disminuir la fuerza mecánica sobre el volante del vehículo, por lo que el control se realiza actuando directamente sobre un motor DC acoplado, a través de engranajes, a la barra de dirección. La potencia del motor es de 90 vatios². Tiene además una etapa reductora de 66:1 para aumentar el par y reducir la velocidad nominal del motor (de 6500 rpm y un par de 110 mNm, a 98,49 rpm y 7,26 Nm). En *Babieca* se ha realizado un estudio previo para determinar el par mínimo para mover el volante: obteniendo que 5 Nm eran suficientes para el vehículo detenido (mayor fricción con el suelo) (Alcalde, 2000). Para esto se ha utilizado una barra dinamométrica.

Tanto la velocidad como el par están sobredimensionados, con la idea de dejar un margen para la acción sobre los diferentes firmes. En las pruebas reales hechas en las instalaciones del CAR, nunca se llegará a los valores teóricos estimados (alrededor de 540 grados/segundos). Por eso podemos reducir más la velocidad y dejar un mayor factor de seguridad en el par del volante. Siguiendo las ofertas que se encontraban en el mercado, se ha determinado una relación de engranajes de 5:6 entre motor y barra de dirección.

$$Velocidad_{volante} = \frac{Motor_{velocidad}}{Relación_{engranajes}} = 98,49rpm * \frac{5}{6} = 82,075rpm \quad (3.1)$$

$$Volante_{torque} = \frac{Motor_{torque}}{Relación_{engranajes}} = 7,26Nm * \frac{6}{5} = 8,71Nm \quad (3.2)$$

Esta relación proporciona un factor de seguridad del 42 % para el par, lo que evita problemas si la fricción entre el neumático y el suelo aumenta. El diagrama de conexión para el control lateral se muestra en la figura 3.1.

El GPS diferencial utilizado es el modelo Trimble MS750, el cual permite lograr una precisión en el posicionamiento del vehículo inferior a 2 centímetros. El bucle de control está definido por la frecuencia de recepción del GPS, que está predefinida en 5 Hz.

²Ver manual de FAULHABER modelo 3863012C, (FMo, 2007).

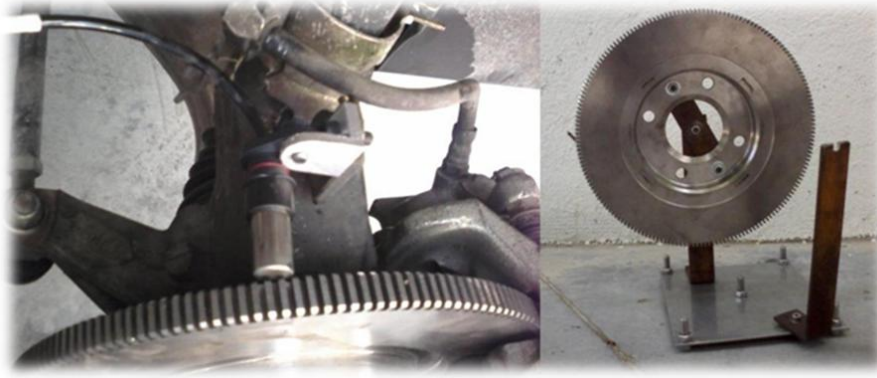


Figura 3.3: Sensor de efecto Hall y rueda dentada instalados en la rueda delantera de *Babieca*

3.4.2. Mejoras en el hardware del control longitudinal

La velocidad es leída utilizando un sensor de efecto Hall acoplado al disco de freno de las ruedas delanteras de las furgonetas el cual ha sido dentado (ver detalle en figura 3.3). Hasta ahora, la velocidad era medida desde el tacómetro y la precisión era escasa (Pérez et al., 2009). También se ha utilizado la información proveniente desde el bus CAN de vehículos a gasolina (Milanés et al., 2009a). Ambos sistemas de medición dependen directamente de los sensores, ya instalados a bordo. En el caso de las furgonetas, este sensor presenta una precisión de 4 pulsos por cada vuelta de la rueda, lo cual puede resultar problemático para realizar un buen control longitudinal a bajas velocidades.

Se ha instalado un nuevo dispositivo para medir la velocidad con más precisión. El dispositivo se adapta a cualquier vehículo comercial (equipado o no con bus CAN), y soporta una frecuencia de muestreo alta dentro del bucle de control utilizando un sensor de efecto Hall. El sensor fue acoplado a un disco dentado instalado en una de las ruedas delanteras de nuestro vehículo (figura 3.3). La salida del sensor está conectada al PC principal a través de un modulo analógico-digital - ADC -. Específicamente las ventajas de instalar este nuevo sensor son:

- Mayor precisión (directamente relacionada con el incremento del número de dientes en la rueda dentada, en total 180).
- Mayor rapidez en la lectura de muestras.
- Compatibilidad con dispositivos y puertos estándares (USB, tarjetas analógicas)
- Aumento del tiempo de muestreo, mejorando la respuesta del control longitudinal.

Considerando el espacio disponible, un disco de freno dentado con un diámetro de 266 milímetros y 180 dientes, se define la distancia recorrida (d_r) por el vehículo como:

$$d_r = 2\pi r \frac{\text{Pulsos}}{180} \quad (3.3)$$

donde r es el radio de la rueda, y los *Pulsos* equivalen al número de pulsos contados por el sensor de efecto Hall. El reloj interno del ordenador de a bordo se utiliza como base de tiempo para calcular la velocidad del vehículo. El error de la medida depende de la velocidad

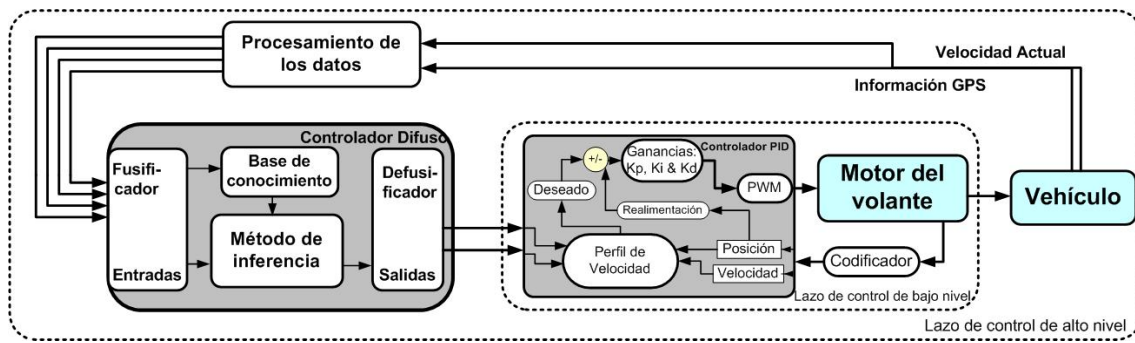


Figura 3.4: Arquitectura para el control lateral en vehículos autónomos

crucero del vehículo (v.g. para las velocidades máximas usadas en los experimentos de este capítulo, 24 km/h, el error estaría del orden de 6,6 cm, tomando en cuenta un ciclo en el control longitudinal de 10 ms).

El sensor de efecto Hall seleccionado ha sido el modelo *SNDH-T4L-G01* de *Honeywell*, que tiene una frecuencia de comunicación de 0 hasta 15kHz. La tarjeta ADC seleccionada para leer esta información ha sido la *National Instruments*, modelo *NI USB-6008*, con cable USB para comunicarse con el PC principal.

3.5. Control en cascada

Para el control lateral del vehículo se ha utilizado una arquitectura en cascada. El lazo externo de control es un controlador borroso que emula al conductor humano y cierra el bucle de control con la señal proveniente del GPS y del sensor de velocidad dispuesto para ello (Pérez et al., 2010b). El lazo interno de control está gobernado por un PID discreto, el cual recibe la consigna desde el controlador borroso y lleva al volante hasta ella lo más rápido y estable posible. El lazo interno de control lo cierra un tren de pulsos proveniente desde un codificador (de 500 pulsos) acoplado al eje del motor.

La utilización de un control en cascada, aunando el control inteligente y el control clásico, presenta múltiples ventajas, ya que se puede extraer lo mejor de cada técnica de control. La frecuencia del lazo interno es mayor que la del externo, para que pueda corregir las perturbaciones antes de que afecten al control de alto nivel. Otra ventaja es que el control interno puede autocorregirse si se cambia la ganancia estática del sistema. Así el PID actuaría como regulador de cambios posibles desde el controlador borroso (figura 3.4).

Muchas aplicaciones industriales utilizan sistemas de control en cascada, aunque éstas utilizan principalmente controladores PID tanto en el alto como en el bajo nivel, y la mayoría tienen variables de control muy lentas (como la temperatura). Sistemas de aire acondicionado y calderas de vapor son algunas de las más comunes (Xie et al., 2007; Wang et al., 2008). Las técnicas de sintonía que se usan en ambos casos son sencillas e intuitivas. Aunque, sus tiempos de respuesta son mucho más lentos que los utilizados en un vehículo controlado.

En nuestro caso, el PID forma el lazo interno de control cuyo tiempo de ciclo es de 10 ms, veinte veces más rápido que el lazo externo que va a la frecuencia de operación o de muestreo (5 Hz, es decir, 200 ms), para que puedan apreciarse sus efectos sobre el sistema. Por otra parte, el PID es un bucle esclavo del bucle de alto nivel (control borroso). A continuación se enumera la secuencia utilizada en la sintonización del sistema: 1) sintonizar

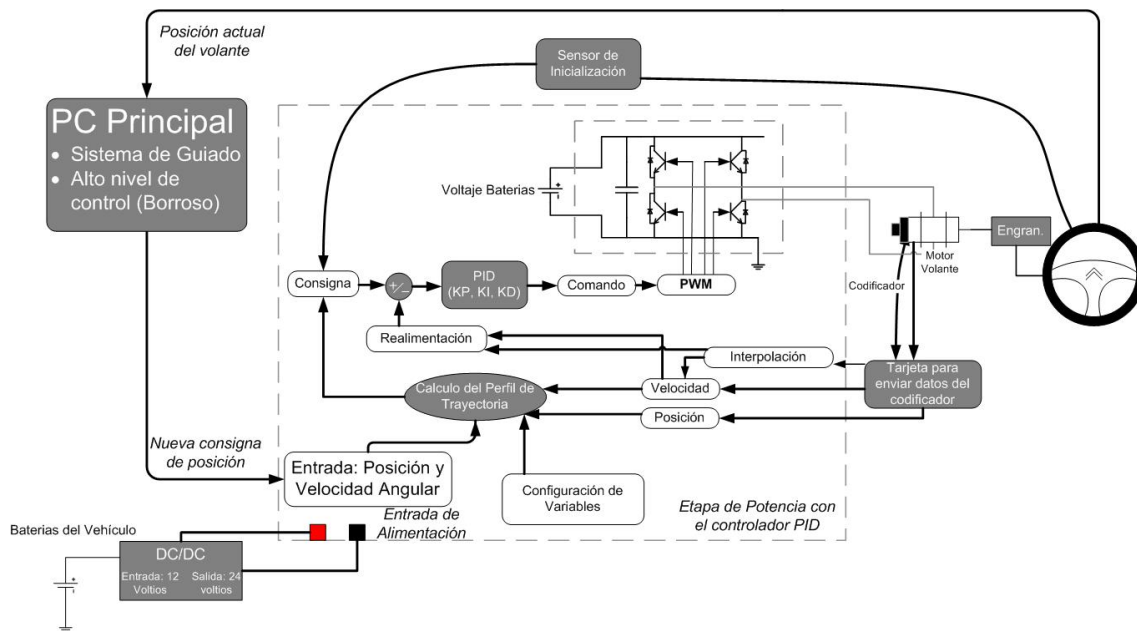


Figura 3.5: Sistema de potencia para el control del bajo nivel del volante

el PID con el lazo del controlador borroso abierto; 2) cerrar el bucle de control y sintonizar los parámetros del borroso; y 3) finalmente, si es necesario, se ajustan las ganancias del controlador del lazo interno.

Durante la etapa de percepción se obtienen los valores de las variables de entrada para el controlador. Éstas son: el error angular, el error lateral, la distancia a la curva y la velocidad del vehículo (se explicarán más adelante en el apartado 3.5.2, lazo externo de control); las dos primeras son para controlar la posición y las dos últimas para controlar la velocidad angular del volante. El controlador borroso procesa estas variables y genera dos salidas: el ángulo del volante entre -540 y 540 grados y la velocidad de giro del volante, entre 0° y 180° grados/segundos (3.4), las cuales son enviadas al controlador del bajo nivel. A continuación, se detalla cada uno de los lazos de control del sistema.

3.5.1. Lazo interno de control

El lazo interno o bajo nivel de control recibe la referencia a la que debe mover el volante desde el lazo control de alto nivel. Éste lleva la señal de referencia al motor del volante, a través de una modulación por ancho de pulsos - PWM - controlando los transistores colocados en el puente H de la etapa de potencia. El lazo interno de control lo cierra un codificador, de 500 pulsos, conectado al eje del motor. Como se ha mencionado en el apartado anterior, este dispositivo de control cuenta con un PID discreto, de tipo no interactivo (Morilla-García, 2007) con seis modos diferentes de control (FMO, 2007). El utilizado en nuestra aplicación es el modo de control de posición, el cual permite generar perfiles de trayectoria del tipo LSPB (*Linear Segments with Parabolic Blends*).

En la figura 3.5 se muestra el diagrama de control interno del dispositivo utilizado para el control de bajo nivel, el cual incluye: las variables de entrada, variables pre-configurables, ganancias del PID, generador de trayectoria y puente H, entre otras. Para determinar las ganancias del controlador PID y la configuración de todos los parámetros, se realizó previamente una estimación del sistema.

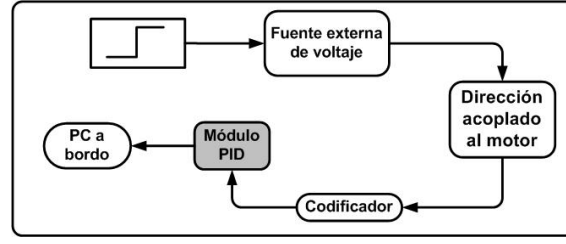


Figura 3.6: Identificación del sistema en lazo abierto

3.5.1.1. Identificación del sistema

La identificación del sistema se hizo utilizando el método de lazo abierto. Para ello, se conectó una fuente externa de voltaje, con una corriente limitada a 3 amperios. En la figura 3.6 se muestra el diagrama de identificación del sistema.

El PC embarcado en el vehículo recibe los pulsos del codificador, a través del módulo PID conectado con un cable Ethernet. En este enfoque solo se muestrea la posición del volante, con una velocidad un poco menor que la máxima deseada (128 grados/segundos). Sin embargo, esta consideración no afecta el procedimiento de identificación, ya que la velocidad está fijada por la potencia entregada por la fuente (Milanés et al., 2009b). Las estimaciones se hicieron a una velocidad longitudinal de aproximadamente 10 km/h. La idea es llegar a una función de transferencia que defina, según las consideraciones descritas, el comportamiento del sistema.

Con la respuesta del sistema a la entrada escalón, estimamos el sistema con la ayuda de la herramienta *Ident* de MatLab, obteniendo la ecuación 3.4 de segundo orden, que representa la función de transferencia del sistema del motor-volante de nuestro vehículo:

$$H(s) = \frac{0,8154 * e^{-j0,5}}{(s + 3,8913)(s + 3,9377)} \quad (3.4)$$

3.5.1.2. Estimación de las ganancias del PID

Con la función de transferencia del apartado anterior, se pueden obtener las ganancias del PID (P_k , I_k , D_k) utilizando las reglas de Ziegler-Nichols (Ogata, 1998). Para incluir el PID en el módulo embarcado en el vehículo es necesario discretizar el controlador estimado, en este caso, utilizando las fórmulas del PID del tipo no interactivo 3.5, 3.6 y 3.7, según (Morilla-García, 2007), considerando una frecuencia de muestreo (100 Hz), donde

$$P_k = K_p(r_k - y_k) \quad (3.5)$$

$$I_k = I_{k-1} + K_p(r_k + r_{k-1} - y_k - y_{k-1}) \quad (3.6)$$

$$D_k = -c_d D_{k-1} + K_p(r_k - r_{k-1} - y_k + y_{k-1}) \text{ con } c_d = \frac{h - 2 * \alpha * T_d}{h + 2 * \alpha * T_d} \quad (3.7)$$

Siendo h el período de muestreo y $\alpha = 0.1$, el factor de filtro derivativo (Morilla-García, 2007). El subíndice k representa el instante de muestreo kh y K_p , I_{k-1} , D_{k-1} y c_d son constantes que dependen de los parámetros del control y del período de muestreo h . Los valores obtenidos para el controlador son: $P_k=1.1358$, $I_k=0.01977$, $D_k=0.01$. Finalmente, la señal de control u_k viene dada por:

$$u_k = P_k + I_k + D_k \quad (3.8)$$

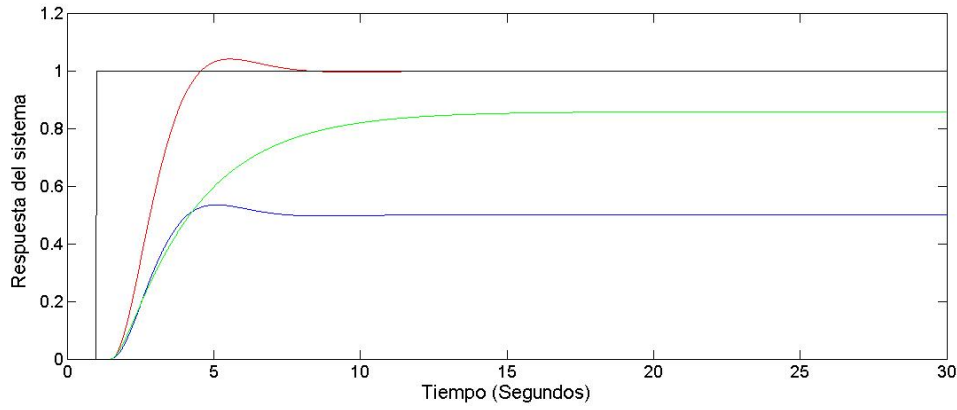


Figura 3.7: Simulación del sistema con Simulink

La figura 3.7 muestra la simulación de los valores obtenidos para el controlador discreto, utilizando Simulink. La gráfica verde representa la respuesta del sistema en lazo abierto, la azul el sistema en lazo cerrado sin controlador y la gráfica roja la salida del sistema con el controlador PID obtenido.

El sistema logra llegar a la referencia a los 8 segundos aproximadamente. Este tiempo de establecimiento se debe a que la fuente utilizada para la estimación limitaba la velocidad a 128 grados/segundos; es decir, para que el volante recorra los 1080 grados del tramo utilizado para la estimación, se requieren unos 8 segundos. Dado que el sistema presenta un pequeño sobrepico, se realizó un ligero ajuste manual, bajando la ganancia P_k .

Se observa que la ganancia derivativa es pequeña, ya que lo más importante para nuestro sistema es que responda lo más rápido posible y sin sobrepicos, la ganancia derivativa ralentizaría la salida del sistema. En los resultados se puede apreciar las ventajas de las ganancias proporcional e integral.

3.5.1.3. Parámetros para el perfil de velocidad

En los estudios de dinámica y control de robots, la generación del perfil de velocidad es uno de los puntos más importantes. Se debe considerar la posición, la velocidad y el tiempo que dura el perfil. En nuestra aplicación generamos trayectorias del tipo LSPB en el ciclo interno de control. Estas trayectorias son sencillas e intuitivas de estimar, sin embargo, las características inerciales que tiene el motor acoplado a la barra del volante, hacen que en nuestro sistema no se perciba con detalle, durante ciclos sucesivos, las rampas de desaceleración (figura 3.8, **2-B**).

El controlador PID *Fmod-IPECMOT 48/10* utiliza dos grupos de variables para generar la referencia, variables dinámicas y variables predefinidas. Las primeras son la posición y la velocidad reales, leídas desde el codificador, y la posición y la velocidad deseadas, que en nuestro caso son entregadas por el controlador de alto nivel (figura 3.5). Las segundas variables son la zona límite (*Dead Zone*), la máxima aceleración y desaceleración y el tiempo del ciclo de control. La zona límite permite desacelerar alrededor del punto deseado. Su valor es: Posición deseada \pm la zona límite. Ésta también es usada para forzar la velocidad del motor a cero.

La figura 3.8 muestra el comportamiento en las trayectorias LSPB, tanto en uno, como en varios ciclos de control. La inercia del eje del motor hace que la trayectoria de la velocidad

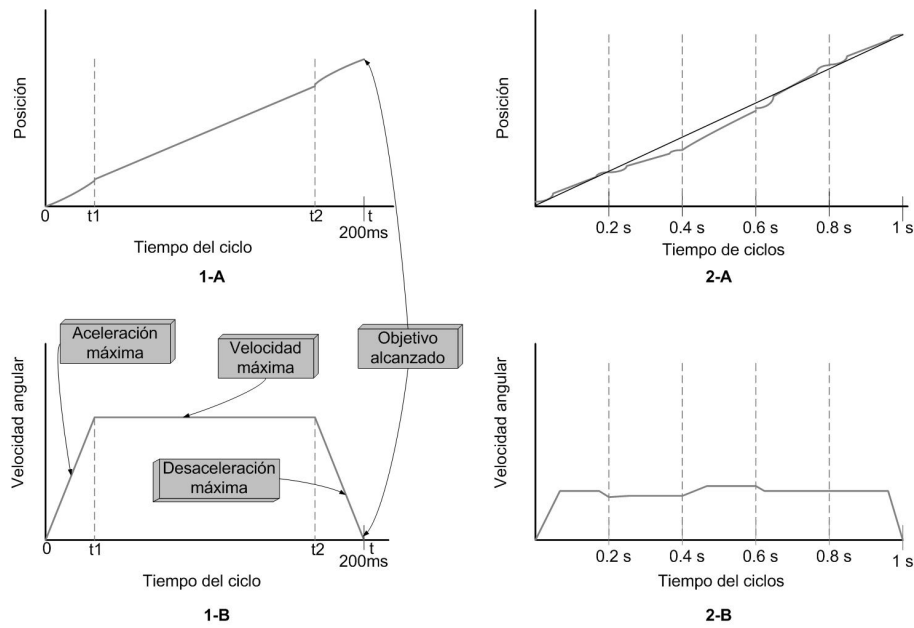


Figura 3.8: Trayectorias LSPB en el lazo interno de control. Perfil de velocidad en un ciclo de control (1 A-B). Perfil de velocidad en varios ciclos de control (2 A-B)

Parámetros	Valor
Tiempo Muestreo	10 ms
Corriente Máxima	8 Amperios
Voltaje Máximo	12 Voltios
Velocidad Máxima	180 grados/segundo
Aceleración y desaceleración	1800 grados/segundo ²
Zona límite	0,2 grados

Tabla 3.1: Parámetros de inicialización para el perfil de velocidad en el bajo nivel

sea continua en el ciclo interno de control del volante.

La aceleración ha sido estimada usando las ecuaciones cinemáticas entre $t=0$ y $t=t_1$. La desaceleración con la última rampa desde t_2 hasta el final del ciclo. El tiempo t_1 debe ser menor que el tiempo de ciclo de control (0.2 segundos), para así dar oportunidad al sistema de estabilizarse en la velocidad de consigna fijada desde el alto nivel. Como criterio de diseño, se consideró t_1 con un 50 % del tiempo total del bucle de control, esto es 100ms. Considerando lo posición del punto, y derivando dos veces obtenemos la aceleración, y de forma análoga la desaceleración:

$$P_{(t)} = P_i + \frac{TopSpeed}{2 * t_1} * t^2 \quad (3.9)$$

$$\ddot{P}_{(t)} = \frac{TopSpeed}{t_1} \quad (3.10)$$

Pero lo más importante es definir la velocidad tope del perfil, ya que es donde se moverá el motor la mayor parte del tiempo. La velocidad máxima es de 180 grados/segundo. Todos los parámetros de inicialización del sistema se resumen en la tabla 3.1.

El objetivo final es lograr un control continuo y robusto del volante hasta alcanzar los valores de velocidad y posición angular ordenados por el control de alto nivel. En trabajos previos (Naranjo et al., 2005; Onieva, 2011) el control en rectas y curvas se hacía con el motor trabajando siempre a la velocidad máxima, lo que ocasionaba una disconformidad en la conducción y una saturación del actuador, reduciendo su ciclo de vida.

Con el control de posición y velocidad propuesto en este trabajo, se reducen las oscilaciones en el control lateral de los vehículos, ya que en todo momento se utiliza el perfil de velocidad acorde a la velocidad longitudinal y la distancia a la siguiente curva. Esto permite emular un comportamiento más similar al de un ser humano cuando conduce por tramos rectos (mueve poco el volante) y tramos curvos (mueve más el volante). Para ello, en el alto nivel, utilizamos un controlador borroso, que será explicado a continuación.

3.5.2. Lazo externo de control

El control de alto nivel o lazo de control externo para está gobernado por un controlador borroso. El ciclo de control lo cierran los datos provenientes del GPS y la velocidad leída directamente desde un sensor de efecto Hall en la rueda delantera. Este controlador envía la posición a la cual debe llegar el volante, junto con la velocidad a la que el bajo nivel debe mover el motor. Para la implementación del controlador borroso se ha utilizado la librería ORBEX (explicada en el capítulo anterior, sección 2.4.2), la cual ha sido desarrollada por el grupo AUTOPÍA en sus comienzos (García et al., 1997a).

El bucle de control tiene una frecuencia de 5 Hz. Como se verá en los resultados, esta frecuencia es suficiente para el buen desempeño del sistema. El controlador borroso propuesto en este capítulo utiliza cuatro variables de entrada: error angular, error lateral, distancia a la curva y velocidad real.

Para controlar un vehículo autónomo que siga un recorrido predefinido, hasta ahora, se habían utilizado dos modos básicos de conducción (Naranjo, 2005; Onieva, 2011): modo de conducción en recta y modo de conducción curva. Cada uno con un controlador que sólo consideraba la posición del volante. El segundo modo de conducción presenta más dificultad que el primero debido a que los giros del volante son mayores y el seguimiento de la trayectoria suele presentar mayor error (Pérez et al., 2011d). En el modo de conducción en recta, el ángulo de variación del volante estaba limitado para mantener el seguimiento de la trayectoria (Naranjo et al., 2005). Hasta el momento, el control de velocidad de giro del volante no había sido considerado en ningún modo de conducción. En esta tesis, se ha considerado un solo controlador que utiliza la posición y la velocidad angular para adaptar el movimiento del volante, independiente del tipo de tramo en que esté circulando el vehículo. En esta sección se presenta la nueva arquitectura para el control lateral en vehículos autónomos, capaz de mejorar el desempeño de éstos desde el punto de vista del confort, robustez y mayor velocidad de ejecución.

3.5.2.1. Variables de entrada y funciones de pertenencia

Las cuatro variables de entrada del controlador borroso se muestran en la figura 3.9. A continuación, se definen cada una de ellas:

- **error angular**: es el ángulo entre la dirección del vehículo y la trayectoria predefinida, medido en grados.
- **error lateral**: es la distancia en metros desde la proyección en el suelo de la parte delantera del vehículo a la trayectoria predefinida.

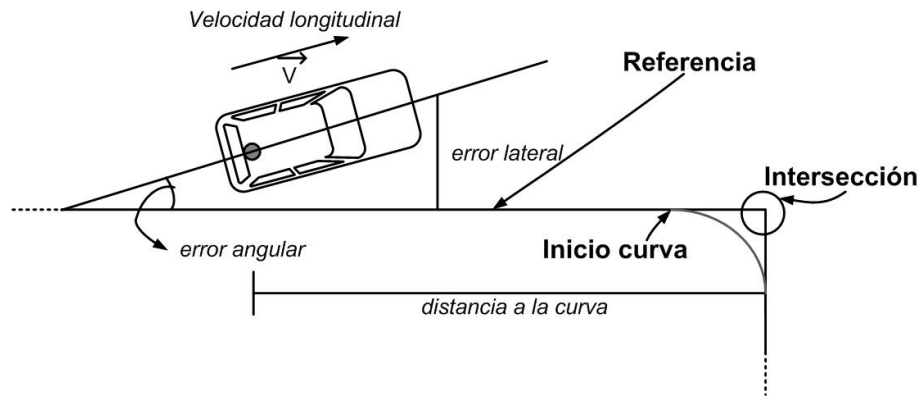


Figura 3.9: Variables de entrada del controlador borroso

- ***distancia a la curva***: es la distancia del vehículo a la próxima curva, se estima utilizando la posición real del vehículo y el mapa de la trayectoria.
- ***velocidad longitudinal***: es la velocidad del vehículo, calculada con el sensor de efecto hall descrito en la sección 3.4.2, medida en kilómetros por hora (km/h).

El proceso de granulación consiste en establecer las particiones borrosas de las variables de entrada. Para ello, el motor de inferencia (ORBEX) utiliza funciones de pertenencia con forma trapezoidal y triangular (sección 2.4.2). Cada función de pertenencia representa una etiqueta lingüística. La figura 3.10 muestra las cuatro funciones de pertenencia correspondientes a cada variable de entrada.

El valor de cada variable de posición se calcula utilizando dos puntos consecutivos generados por el sistema de posicionamiento del vehículo (Milanés et al., 2008). Además, cada una cuenta con tres etiquetas lingüísticas: derecha, centro e izquierda. Las funciones de pertenencia del *error lateral* y el *error angular* que se muestran en el lado izquierdo de la figura 3.10.

Las nuevas variables introducidas tienen una doble misión: en primer lugar, eliminar la necesidad de dos controladores distintos para rectas y curvas y, en segundo lugar, generar la velocidad de giro del volante. La variable *distancia a la curva* se determina con la distancia del vehículo hasta el siguiente punto de intersección (en la figura 3.9 se muestra la intersección donde se cortan las prolongaciones de dos segmentos rectos consecutivos). Tres etiquetas lingüísticas han sido definidas para distinguir cuando el vehículo está lejos, cerca o dentro de la curva. La parte superior derecha de la figura 3.10 muestra la función de pertenencia correspondiente.

La última variable de entrada del controlador de velocidad es la velocidad real del vehículo, medida en km/h. Las etiquetas lingüísticas utilizadas son: Poca, Media y Mucha, y se aprecian la parte inferior derecha de misma figura.

3.5.2.2. Reglas borrosas

El método de inferencia utilizado es el propuesto por Mamdani (Mamdani, 1974). El controlador borroso permite escribir las reglas en un lenguaje casi natural, por ejemplo, si el controlador interpreta que el vehículo se está desviando del camino a la derecha, ordena al volante girar a la izquierda, como haría un conductor humano. Análogamente se escriben reglas para controlar la velocidad de giro, por ejemplo si la curva está lejos gira el volante poco.

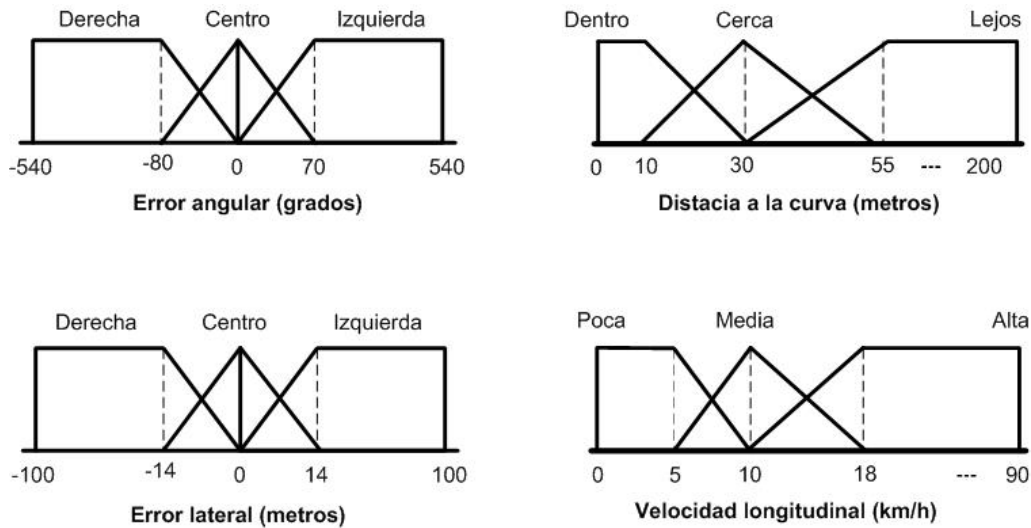


Figura 3.10: Funciones de pertenencia para el control del volante

Las reglas utilizadas para el control de posición del volante son:

- SI *Error lateral* Izquierda ENTONCES *Posición volante* Derecha
- SI *Error lateral* Centro ENTONCES *Posición volante* Mantener
- SI *Error lateral* Derecha ENTONCES *Posición volante* Izquierda
- SI *Error angular* Izquierda ENTONCES *Posición volante* Derecha
- SI *Error angular* Centro ENTONCES *Posición volante* Mantener
- SI *Error angular* Derecha ENTONCES *Posición volante* Izquierda

Donde la *Posición volante* es la variable de salida del controlador de posición codificada por tres singletons. A continuación se presenta la base de reglas para controlar la velocidad angular, duales con respecto al centro de la curva:

- SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. real* Poca ENTONCES *Vel. angular* Media
- SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. real* Media ENTONCES *Vel. angular* Media-Alta
- SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. real* Alta ENTONCES *Vel. angular* Alta
- SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. real* Poca ENTONCES *Vel. angular* Media
- SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. real* Media ENTONCES *Vel. angular* Media-Alta
- SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. real* Alta ENTONCES *Vel. angular* Media-Alta
- SI *Dist. a la curva* Lejos Y *Vel. real* Poca ENTONCES *Vel. angular* Media
- SI *Dist. a la curva* Lejos Y *Vel. real* Media ENTONCES *Vel. angular* Media
- SI *Dist. a la curva* Lejos Y *Vel. real* Alta ENTONCES *Vel. angular* Poca

La fusión de ambos conjuntos de reglas en un mismo controlador permite que el volante tenga un comportamiento estable, en función de las condiciones de la marcha.

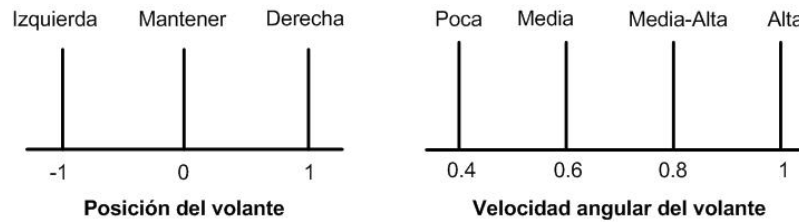


Figura 3.11: Salidas singleton del controlador borroso, para posición y velocidad

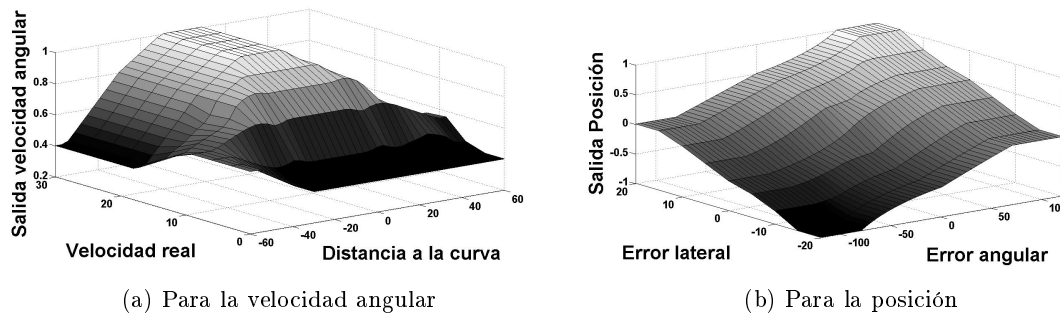


Figura 3.12: Superficies de control

3.5.2.3. Variables de salida

El proceso de concreción obtiene el valor de las salidas del controlador. Para esto es necesaria la definición de los valores correspondientes a los singleton de salida (Sugeno, 1999). En la figura 3.11 se muestran los valores de cada salida singleton, tanto para salida de posición como la de velocidad angular. Estos son: Izquierda (-1) Mantener (0) y Derecha (+1) para la variable de salida de la posición (parte izquierda de la figura 3.11), y los valores Poca (0.4), Media (0.6), Media-Alta (0.8) y Alta (1) para la variable de salida de la velocidad angular (parte derecha de la figura 3.11).

Los valores de salida para el controlador de velocidad están limitados a un mínimo de 0.4, ya que, según experimentos con el motor acoplado a la dirección del vehículo para perfiles de velocidades menores, éste no tenía suficiente potencia para moverse.

Las superficies de control mostradas en la figura 3.12, muestran la estabilidad del control propuesto. La gráfica de la izquierda (3.12a) muestra la salida de la variable de velocidad. Se puede observar que el controlador manda la mayor consigna cuando el vehículo se encuentra en plena curva y su velocidad es alta (para entornos urbanos). La superficie de control de la derecha (3.12b) muestra el comportamiento de la variable de posición. La suavidad de la superficie muestra la buena sintonía del controlador.

3.6. Experimentos y resultados

Con el fin de mostrar las prestaciones del sistema de control presentado en este capítulo, se han realizado diversas pruebas, utilizando recorridos con curvas de diferentes ángulos, y contemplando un amplio abanico de velocidades. Las pruebas se han realizado en las instalaciones del CAR. En los primeros experimentos se detallará el comportamiento del lazo de control a bajo nivel, es decir el gobernado por el PID. Más adelante se mostrarán los experimentos que demuestran el funcionamiento completo del sistema de control lateral

en cascada propuesto en este capítulo.

3.6.1. Validación del bajo nivel

La primera tarea ha sido comprobar la respuesta del controlador PID, según los requisitos de diseño. Se ha diseñado un experimento con el vehículo a velocidad constante (en este caso 10 km/h) y sobre un terreno sin asfalto en las instalaciones del CAR, con el objetivo de girar el volante a la consigna de referencia. En la figura 3.13 se muestra el resultado de esta prueba. Puede observarse como el PID llega a una referencia de 360 grados, a la velocidad angular máxima. Puede observarse que el controlador corrige las perturbaciones producidas por las condiciones del suelo. Las tres gráficas se han obtenido con diferentes aceleraciones del perfil de velocidad: a $75^\circ/s^2$ (la roja), a $300^\circ/s^2$ (la azul) y a $900^\circ/s^2$ (la negra).

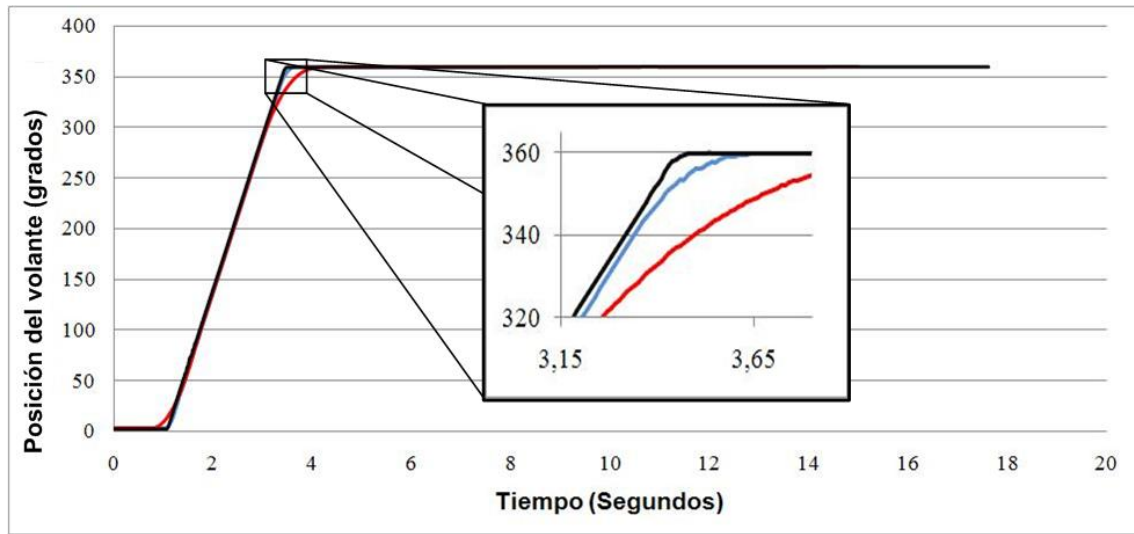


Figura 3.13: Salida del controlador PID a diferentes aceleraciones

Estos valores de aceleración (y desaceleración) son menores para el valor inicial seleccionado, $1800^\circ/s^2$, pero se han utilizado para verificar el comportamiento del sistema de bajo nivel. Los valores de aceleración son acordes con la velocidad del ciclo de control del lazo externo, ya que es importante que se establezca en la posición deseada en menos de 200 ms (tiempo de ejecución del ciclo de control). En la ampliación, figura 3.13, se observa que con la menor desaceleración (gráfica roja) se llega a la posición asignada muy lentamente, en este caso 360 grados en casi tres ciclos de control (entre 3.15 y 3.75 segundos), mientras que para la aceleración más alta ($900^\circ/s^2$, gráfica negra) el controlador llega rápidamente a la referencia deseada.

En las gráficas de la figura 3.14, se han utilizado diferentes perfiles de velocidad, con la misma aceleración y desaceleración establecida en $300^\circ/s^2$. Se observa la respuesta del volante para una consigna de 180 grados. La gráfica negra muestra el comportamiento a la máxima velocidad $180^\circ/s$, la azul a $90^\circ/s$ y la roja a $45^\circ/s$. Se puede observar que el sistema llega a tiempo al punto indicado. Es importante destacar que la buena sintonía del PID hace que no se presenten sobrepicos en el sistema.

La figura 3.14 también muestra las velocidades reales que alcanza el volante. Se aprecia que no llega al tope teórico, esto se debe a diferentes factores: la fricción de las ruedas sobre el terreno, la inercia del sistema y la generación del perfil de velocidad del módulo utilizado.

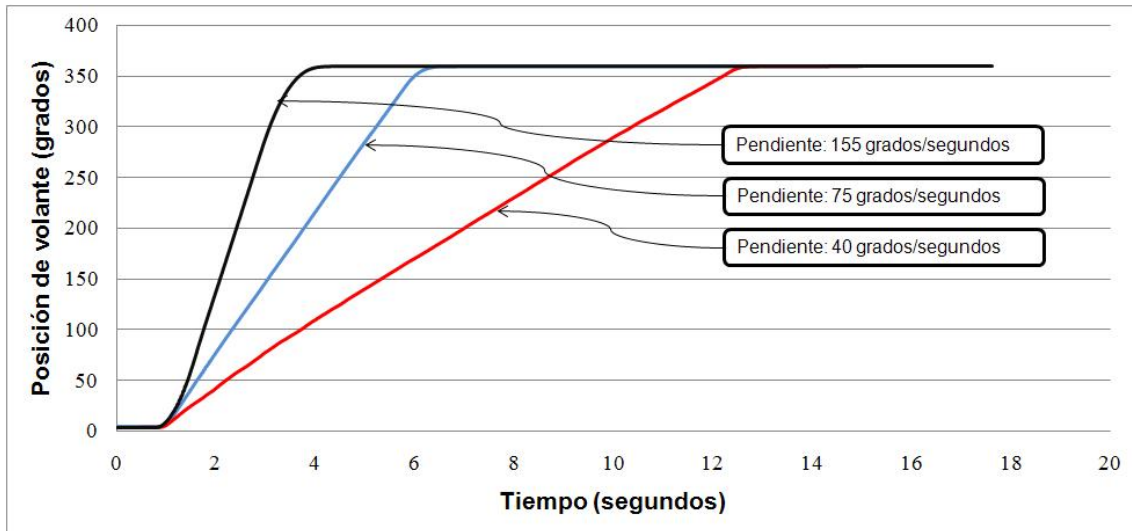


Figura 3.14: Respuesta del volante a un impulso de 180 grados, a diferentes perfiles de velocidades

Aunque el error máximo de la velocidad es de 16.6 % (para la velocidad establecida en $90^\circ/\text{s}$) el sistema responde perfectamente ante diferentes velocidades de consigna, tal como se indica en la leyenda de la figura 3.14.

3.6.2. Experimentos con curvas de entornos urbanos

Como primera validación del sistema de control lateral en cascada para vehículos autónomos, se han realizado pruebas a una velocidad de 12 km/h. Las pruebas tienen como objetivo presentar el comportamiento del sistema para entornos urbanos.

La ruta seleccionada es un circuito con ocho curvas con ángulos de giro de aproximadamente 90° , cuatro a la izquierda y cuatro a la derecha respectivamente. Los resultados del recorrido se muestran en la figura 3.15.

Para validar el algoritmo de control presentado se ha realizado un cálculo del error lateral en función de la trayectoria seleccionada. La línea de referencia está formada por segmentos rectos, sin embargo para el cálculo del error en las curvas se ha realizado una aproximación cuadrática de la trayectoria objetivo por curvas de Bezier, por comparación con trayectorias reales hechas por un conductor humano (Han et al., 2010). La tabla 3.2 muestra el error cuadrático medio RMSE con respecto a la línea de referencia. Se observa que existe mayor error cuando el vehículo circula en curvas, que en tramos rectos. Sin embargo, este error es todo el tiempo menor a un metro, garantizando en todo momento que el vehículo permanece dentro del carril, que tiene unos 3 metros de ancho.

<i>Error RMSE</i>	
Rectas	0.3182
Curvas	0.8287
Total	0.4997

Tabla 3.2: RMSE para recorridos a baja velocidad

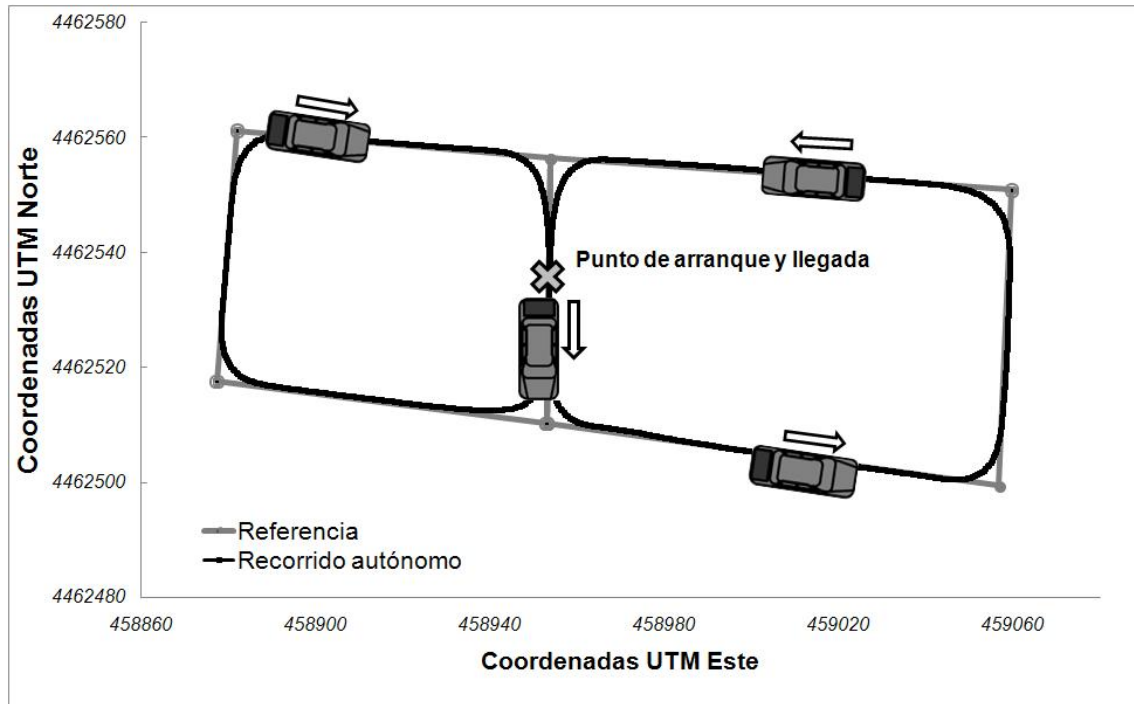


Figura 3.15: Recorrido autónomo en entorno urbano a 12 km/h

Cuando el vehículo se aproxima a una curva es importante que estime el instante en el que ha de empezar a girar el volante. En esta línea, algunas investigaciones han estimado el tiempo (promedio) de reacción de un conductor para empezar a mover el volante cuando el vehículo se acerca a una curva, v.g.: Tatchikou estimó este tiempo en 1,5 segundos (Tatchikou et al., 2005). Estudios más recientes muestran distribuciones probabilísticas que van entre 0.75 hasta 2.6 segundos (Fukuoka et al., 2009). Sin embargo, los tiempos de reacción de los conductores dependen de muchos factores (edad, nivel de fatiga, condiciones climáticas, etc.) que escapan del alcance de esta investigación.

Es por ello que para este trabajo se ha estipulado la distancia máxima a la cual el sistema puede empezar a mover el volante. Esta distancia está establecida en 17 metros, ya que para las velocidades urbanas máximas consideradas en este trabajo, de 24 km/h, el tiempo para llegar a la próxima curva de 2,55 segundos, satisfaciendo así el umbral de reacción de un conductor promedio considerado en trabajos anteriores.

Este valor varía con el ámbito de aplicación, para autopistas (velocidad máxima 120 km/h), carreteras nacionales (velocidades de 100 y 90 km/h) o conducción urbana, desde 20 km/h para zonas escolares hasta 50 km/h. La motivación para fijar este valor se debe a las limitaciones de nuestro circuito de pruebas.

3.6.3. Experimentos con diferentes curvas y velocidades

Los experimentos que se describen a continuación muestran los resultados del sistema de control en cascada para la dirección de un vehículo real en curvas de diferentes ángulos y considerando un amplio rango de velocidades. Estos ilustran el desempeño de ambos niveles de control, explotando al mismo tiempo las ventajas de las técnicas de control clásico e inteligente.

El mapa predefinido que se ha sido utilizado en estas pruebas está basado en el trazado

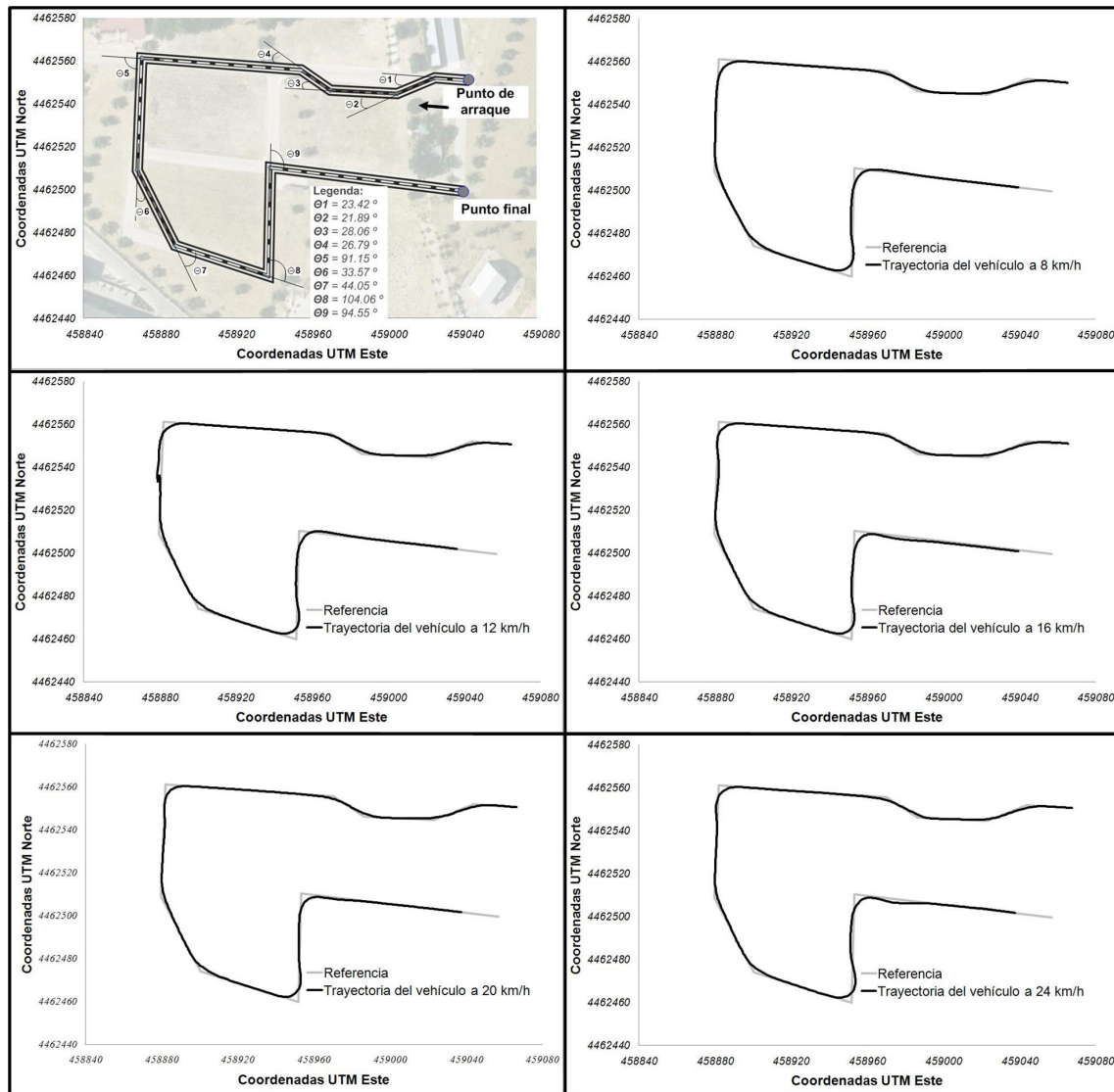


Figura 3.16: Recorrido que incluye curvas de diferentes ángulos y velocidades.

de las pistas del CAR. Aunque también han sido considerados segmentos no pavimentados (figura 3.16). En varias ocasiones el vehículo debe entrar y salir de los tramos pavimentados, demostrando que el sistema responde de forma óptima a éstas perturbaciones imprevistas. El motivo de este tipo de trazado se debe a que el circuito pavimentado solo presenta curvas de alrededor de 90° , y el objetivo es demostrar que el sistema de control es válido en un amplio rango de curvas y velocidades.

En la parte superior izquierda de la figura 3.16 se muestra el camino utilizado. Los ángulos de las curvas varían entre 21° y 105° . La ruta consta de diez tramos rectos de diferente longitud, con un recorrido total de alrededor de 500 metros. Las secciones definidas entre las curvas θ_1 y θ_4 y las curvas θ_6 y θ_7 son sin pavimentar.

Las velocidades utilizadas en estos experimentos están definidas entre 8 y 24 km/h. En el resto de la figura 3.16 se muestran el funcionamiento del vehículo realizando el seguimiento de ruta predefinida. Se han definido cuatro velocidades para probar la versatilidad del controlador propuesto: 8, 12, 16 y 20 km/h. Estas velocidades fueron definidas teniendo

en cuenta que velocidades mayores en trazados de tanta curvatura resultan inapropiadas para el confort y la seguridad de los pasajeros en circuitos urbanos.

Por otra parte, se ha realizado un experimento extra a mayor velocidad, a 24 km/h, para probar la robustez del controlador propuesto. En esta última prueba, aunque el vehículo se mantiene dentro de la carretera, se observa que el error es mayor que en el resto de experimentos (ver tabla 3.3), sobre todo en la curva más pronunciada (la $\theta 8$, según se muestra en la parte inferior derecha de la figura 3.16). De hecho, esta curva es la más pronunciada del circuito, el vehículo debe girar alrededor de los 105° . Incluso cuando el vehículo sale y entra en secciones no pavimentadas de la ruta, éste sigue la referencia sin problemas.

Los valores de las variables de nuestro controlador se han calculado basándose principalmente en la información proveniente del GPS diferencial que está instalado en los coches, y el sensor de efecto hall conectado en las ruedas del vehículo. La robustez del sistema de control en cascada ante posibles fallos del sistema de posicionamiento se comprueba en estos experimentos. La corrección diferencial, que permite disminuir significativamente el error en el posicionamiento de los sistemas GPS tomando como referencia una estación base, puede perderse debido a fallos en las comunicaciones inalámbricas (Godoy et al., 2010). De esta forma, queremos comprobar la robustez del sistema y el tiempo que sería capaz de mantener el vehículo dentro del carril con pequeños fallos en el sistema de posicionamiento.

En la grafica central izquierda de la figura 3.16 (después de la curva $\theta 5$), con el vehículo circulando a 12 km/h, se observa una pérdida en la corrección diferencial de la señal del GPS. La precisión del GPS pasa de 2 cm (modo de envío *RTK*, *Real Time Kinematic*) a 50 cm (modo de envío *DGPS*, *Differential Global Position System*), durante 2 ciclos de control, es decir, 400 milisegundos. Normalmente este tipo de errores se solventan con la acción de una IMU según (Milanés et al., 2008), pero dado que se pretende mostrar la robustez del sistema para fallos de posicionamiento, se ha prescindido de ella en estos experimentos. No es parte de esta tesis presentar una solución al sistema de posición que ya ha sido abordado en trabajos previos, y que actualmente se encuentra comercializado en sistemas de posicionamientos modernos (Milanés et al., 2008). Consecuentemente, el sistema de control en cascada es capaz de filtrar ésta señal, evitando saltos repentinos en la dirección de las ruedas (o el volante), y manteniendo al vehículo en el camino. Si este error en la señal persiste (por más de 5 ciclos de control), el vehículo está programado para hacer una parada de emergencia. Sin embargo, éste no es el caso de éste experimento, ya que la pérdida en la precisión de la señal ha sido menos de un segundo, y el vehículo ha continuado sin mayores inconvenientes el recorrido establecido.

El sistema desarrollado busca mejorar la estabilidad en el control manteniendo seguridad y confort, como se puede apreciar en la figura 3.17. Los gráficos muestran las dos salidas del controlador: la posición y la velocidad angular del volante, y los resultados de los experimentos realizados a las cinco velocidades antes mencionadas. La escala del tiempo (el eje horizontal) de cada experimento varía de 240 a 80 segundos, en correspondencia con la velocidad longitudinal del vehículo. Los gráficos del lado izquierdo de la figura expresan el funcionamiento con respecto a la posición del volante. Las curvas corresponden a la salida de posición del controlador borroso (la línea gris) y la posición real del volante del vehículo (línea negra, leída desde el codificador acoplado al motor, figura 3.1) en grados.

El controlador de bajo nivel, gobernado por un PID, permite estabilizar la respuesta entregada por el alto nivel, evitando oscilaciones no deseadas, las cuales pueden ser peligrosas, sobre todo a altas velocidades. En el segundo grafico de la parte izquierda de la figura 3.17, alrededor de los 70 segundos, la salida del controlador de alto nivel muestra un gran aumento, debido a las pérdidas en la precisión del GPS mencionadas en el párrafo

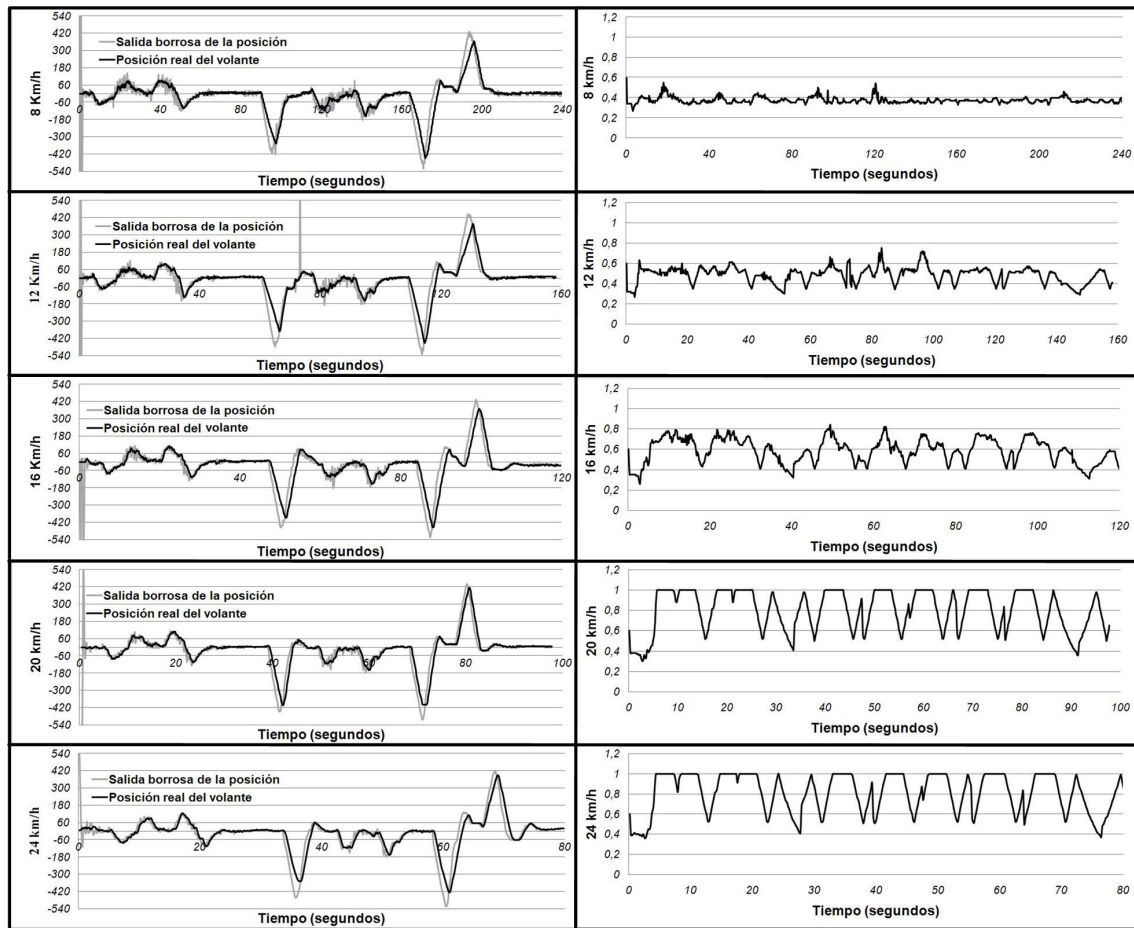


Figura 3.17: Variables de salida del controlador borroso: posición del volante, antes y después, por la acción de control de bajo nivel (izquierda) y velocidad angular (derecha) del volante a diferentes velocidades: 8, 12, 16, 20, y 24 km/h.

anterior. Sin embargo, el control de la velocidad angular y la sintonía del PID permiten el filtrado de movimientos repentinos cuando el vehículo está en segmentos rectos del camino, lejos de las curvas; por lo tanto, en la práctica, el sistema continua funcionando a pesar de esta pequeña pérdida en las señales de entrada.

También podemos observar las fluctuaciones que presenta el controlador borroso al principio de cada experimento. Esto se debe a que las dos posiciones continuas del GPS que se utilizan para calcular las variables de entrada del controlador están muy próximas. A medida que el vehículo empieza a moverse, la salida del controlador mejora. Esta salida también oscila un poco cuando el vehículo toma una curva a muy baja velocidad (experimentos a 8 km/h), pero gracias a las ventajas de utilizar la velocidad angular y la acción del PID, en la posición real del volante no se ven reflejados estos leves saltos de la referencia.

Los gráficos de la parte derecha de la figura 3.17 muestran la salida borrosa de la velocidad angular del volante. Como se aprecia en las superficies de control, figura 3.12b, este controlador ha sido diseñado para velocidades entre un rango de 5 km/h y 18 km/h, las velocidades habituales en entornos urbanos con curvas alrededor de 90° o mayores, para evitar accidentes. Por lo tanto, en los experimentos a 20 y 24 km/h, la salida del controlador es parecida, debido a que las funciones de pertenencia (*velocidad real*) está saturada en el

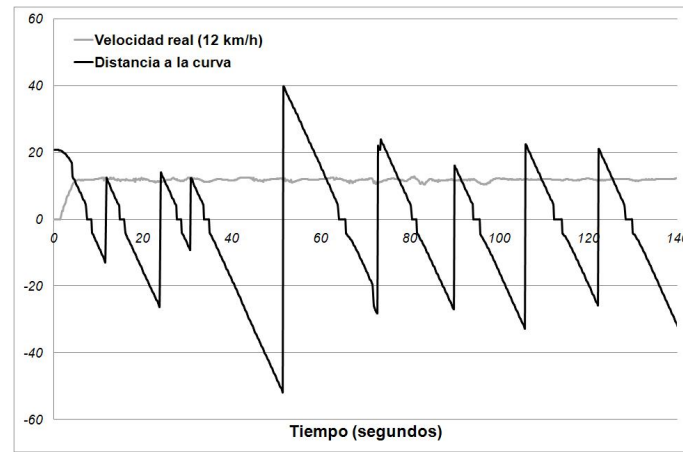


Figura 3.18: Variables de entrada utilizadas para controlar la velocidad angular del volante: Distancia a la curva y velocidad real (a 16 km/h).

	Velocidad (km/h)				
Tramo	8	12	16	20	24
Rectas	0.370	0.515	0.584	0.239	0.513
Curvas	0.963	0.974	0.834	0.780	0.996
Total	0.706	0.774	0.716	0.569	0.791

Tabla 3.3: RMSE para recorridos a diferentes velocidades

valor lingüístico *alta* hasta 18 km/h (figura 3.10). Como se mencionó anteriormente esto perjudica el comportamiento del controlador a 24 km/h, aunque el vehículo no supera el error medio en curva de un metro, y por tanto se mantiene siempre dentro de la ruta.

El progresivo aumento que se observa en la salida del controlador de la velocidad angular es debido a que las pruebas se han realizado con el mismo circuito, por lo tanto, el comportamiento de una de las variables de entrada del controlador (*distancia a la curva*) tiene la misma forma a diferentes velocidades. La figura 3.18 muestra la *distancia a la curva* y la *velocidad real* del vehículo utilizadas en el experimento a 12 km/h. El significado de los valores negativos de la *distancia a la curva* se refiere a que el vehículo ha pasado la curva, y estos valores vuelven a ser positivos una vez que se supere la mitad de tramo recto posterior a la curva o cuando se calcula el siguiente tramo del recorrido.

La figura 3.18 muestra como, una vez que el vehículo está a menos de 5 metros del punto de intersección, la variable es forzada a cero. Esto se debe a que, en este intervalo, el vehículo está cambiando de un segmento de referencia a otro. Por lo tanto, y gracias a la forma trapezoidal de la función de pertenencia (figura 3.10, etiqueta lingüística *dentro*), podemos evitar cualquier cambio repentino debido a esta situación.

Finalmente, la tabla 3.3 muestra el error cuadrático medio RMSE en función de los experimentos realizados a diferentes velocidades. Al igual que en la tabla anterior, los errores se han clasificado en función del tipo de tramo: rectas y curvas. Para los tramos rectos, el error ronda los 50 centímetros, incluso menos para algunas velocidades. No se ha podido comparar con los sistemas desarrollados previamente (Naranjo, 2005; Onieva, 2011) ya que estos eran incapaces de funcionar a velocidades superiores a los 8 y 12 km/h, respectivamente.

Capítulo 4

Control longitudinal neuro-borroso para vehículos autónomos

La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.

Aristóteles

4.1. Introducción

La acción sobre los actuadores del control longitudinal (pedales) de un vehículo autónomo es un ejemplo claro de un sistema no lineal, por lo que su ajuste requiere especial atención. Dentro de las técnicas de inteligencia artificial, la lógica borrosa presenta una de las mejores alternativas, ya que permite controlar procesos complejos de forma sencilla gracias al conocimiento experto de los mismos. El control longitudinal en vehículos autónomos es uno de los temas más estudiados e importantes dentro del campo de los ITS (Naranjo et al., 2006b; Milanés et al., 2009a; Onieva, 2011). En este capítulo, se propone un sistema neuro-borroso para trasladar el conocimiento de conductores expertos sobre el control longitudinal con el fin de ajustar los parámetros de un controlador borroso. La técnica neuro-borrosa utilizada en este trabajo se basa en **ANFIS** (*Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference*).

Este capítulo se divide en dos partes: La primera utiliza el controlador propuesto en (Onieva, 2011) como punto de partida para generar un nuevo controlador neuro-borroso, en el que la salida se conecta a un contador incremental, que evita saltos bruscos en la acción sobre los pedales. En la segunda parte se presenta un estudio comparativo para el control de crucero a bajas velocidades con cuatro técnicas: Proporcional integral -**PI**-, PI inteligente -**i-PI**-, lógica borrosa y sistemas neuro-borrosos. Se evalúan las ventajas e inconvenientes de cada una de estas técnicas. Los resultados muestran como los controladores neuro-borrosos tienen un buen desempeño, aunque su proceso de sintonización no es intuitivo, como en los controladores borrosos. Las pruebas han sido llevadas a cabo en uno de los vehículos a gasolina del grupo AUTOPÍA.

4.2. Planteamiento del problema

La conducción en atascos y a bajas velocidades es uno de los retos que tienen los gestores del tráfico en las grandes ciudades. En el anuario de movilidad del año 2009, sólo

en Madrid (España), se ha registrado que alrededor de un millón de conductores sufren atascos de más de treinta minutos al día. El coste anual de esto supera los 800 millones de euros (Bel y Nadal, 2009).

En el caso del sector de la automoción, muchos de los esfuerzos se centran en el desarrollo de sistemas de control automático para la velocidad y algunas soluciones, de laboratorio, se centran en la gestión de tráfico (Milanés et al., 2009a; Onieva et al., 2011). El objetivo principal de estos controladores es mejorar la seguridad y el confort de los ocupantes del vehículo, aliviando al conductor humano de las tareas tediosas como conducción en atascos, así como hacer que el flujo de tráfico sea más eficiente. Una de las primeras implementaciones en vehículos reales fue el control de cruce, controlando sólo el acelerador (Laumond, 1998; Aono y Kowatari, 2006). Hoy en día se está imponiendo el uso del ACC (Moon et al., 2009), diseñado para mantener una distancia de seguridad con el vehículo precedente. En (van Kampen, 1996) se presenta un estudio sobre el impacto que ha tenido la inclusión del CC en los vehículos modernos, donde se muestra como ha disminuido en un 50 % los accidentes con lesiones sobre los ocupantes de vehículos en autovías. Sin embargo, estos sistemas sólo están disponibles para velocidades altas. Para velocidades inferiores a los 15 km/h, los controladores de cruce presentan fallos relevantes.

Algunas de las soluciones de laboratorio que se presentan se basan en modelos complejos de vehículos (Shladover, 1995). No obstante, algunos trabajos previos ya han demostrado que la lógica borrosa ofrece grandes ventajas a la hora de controlar los actuadores longitudinales de un vehículo autónomo (Onieva, 2011). Esta técnica cobra especial interés cuando el vehículo utilizado es con motor a gasolina.

El propósito de este capítulo es desarrollar controladores neuro-borrosos que permitan mejorar los controladores borrosos propuestos en (Onieva, 2011), para el control de cruce en entornos urbanos. Además, se presenta un estudio comparativo con diferentes técnicas de control que permite analizar los pros y los contras de las diferentes técnicas, destacando el método de sintonía con técnicas neuro-borrosas. Finalmente, se presentan nuevos controladores borrosos con salida absoluta, que actúan directamente sobre los pedales, los cuales resultan muy intuitivos de ajustar, y han servido como paso previo a los controladores utilizados en la primera competición europea entre vehículos autónomos en autovías (GCDC 2011), presentados en el capítulo 5, sección 5.7.

4.3. Trabajos previos

Las investigaciones en sistemas autónomos capaces de adaptar la velocidad de un vehículo, en escenarios urbanos, es uno de los temas más importantes para los fabricantes de automóviles. Estos sistemas, basados en la acción combinada del acelerador y el freno, también son conocidos como controladores de cruce inteligentes (Girard et al., 2005). Enfoques recientes han utilizado robots a escala como plataformas de pruebas (Cai et al., 2010), y vehículos eléctricos (Naranjo et al., 2006b).

Para entornos urbanos (bajas velocidades) se han desarrollado diferentes sistemas ADAS basados en señales acústicas, hápticas y visuales para advertir al conductor sobre posibles colisiones (Lindgren et al., 2009), sin considerar la acción sobre el vehículo. Por ello el siguiente paso se centra en los controladores y sistemas de decisión para la conducción autónoma.

Los controladores borrosos son poco dependientes de complejos modelos matemáticos en los sistemas controlados. Sin embargo, no existen métodos estandarizados para transformar, o interpretar, el conocimiento de expertos plasmado en bases de datos y reglas de sistemas borrosos.

Los sistemas neuro-borrosos -NFS- utilizan redes neuronales -NN- y sistema de inferencia borrosa -FIS-. Los NFS combinan la potencia semántica de los sistemas borrosos con la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales. Por lo tanto, los NFS son capaces de representar modelos por medio de reglas *si-entonces* en una estructura de red, a las que puede aplicarse algoritmos de aprendizaje basados en redes neuronales artificiales (Jang, 1993).

Hoy en día, muchas aplicaciones utilizan NFS para controlar e identificar sistemas no lineales (Babuska y Verbruggen, 2003). La mayoría de estas aplicaciones utilizan uno de los primeros NFS, el conocido como ANFIS, debido a su simplicidad y a su eficiencia computacional (Jang, 1993; Gajate y Haber, 2009).

La fusión entre diferentes técnicas de inteligencia artificial, como las NN y los FIS, tiene un creciente interés entre los investigadores en diversos campos de la ciencia y la ingeniería, debido a la necesidad de desarrollar sistemas adaptativos e inteligentes para resolver los problemas del mundo real. Las redes neuronales aprenden ajustando el peso en las conexiones entre nodos (Jin et al., 1994). Muchos de estos avances se encuentran en (Babuska y Verbruggen, 2003; Haijun, 2008; Quek et al., 2009; Vatankhah et al., 2009).

En los ITS, los sistemas neuro-borrosos han sido utilizados para el modelado del flujo de tráfico en autovías, utilizando los sistemas conocidos como POPFNN-TVR (*Pseudo Outer-Product Fuzzy-Neural Network, with Truth-Value-Restriction method*) (Quek et al., 2009). Con este modelo, los autores propusieron una planificación para el comportamiento del transporte en este entorno.

En los últimos años, han surgido algunas aplicaciones con NFS para vehículos. En (Vatankhah et al., 2009) han controlado la vibración en la suspensión de vehículos con pasajeros, mejorando el confort dentro del mismo. Incluso algunos autores han comenzado a probar control de velocidad en prototipos reales, pero solo bajo condiciones especiales (sobre un rodillo de arrastre) (Jinlin et al., 2009).

Dentro del programa AUTOPIA se han realizado muchos trabajos en el control de crucero en vehículos comerciales. La mayoría de estos enfoques se han basado en la lógica borrosa, debido a la gran experiencia del grupo en este campo. El propósito principal de este capítulo es mejorar los controladores borrosos longitudinales desarrollados previamente en (Onieva, 2011), tomando en cuenta la experiencia de conductores expertos, así como el confort y el uso eficiente sobre los actuadores. Para ello se han utilizado sistemas neuro-borrosos del tipo ANFIS.

4.4. Plataforma de pruebas

El vehículo utilizado es *Clavileño* (sección 2.4.1). En la figura 4.1 se muestran los actuadores y los principales dispositivos embarcados en el vehículo. Las modificaciones hechas permiten que se pueda enviar una señal de control a cada uno de los actuadores longitudinales (acelerador y freno).

Para la acción sobre el acelerador se utiliza una tarjeta PCMCIA conectada al PC embarcado. Esta tarjeta permite leer datos desde el bus CAN del vehículo, así como enviar un voltaje de referencia, entre 0 y 5 voltios, al pedal del acelerador. Los detalles de la instalación de la tarjeta se encuentra en (Milanés et al., 2010b).

Por otra parte, se ha instalado un sistema electro-hidráulico para el freno, ubicado en el maletero del vehículo, en el lugar reservado para la rueda de repuesto. En esta ubicación la bomba se encuentra protegida de posibles daños. Este sistema se conecta al circuito de frenado del vehículo, permitiendo actuar sobre el mismo a través del PC de control. En

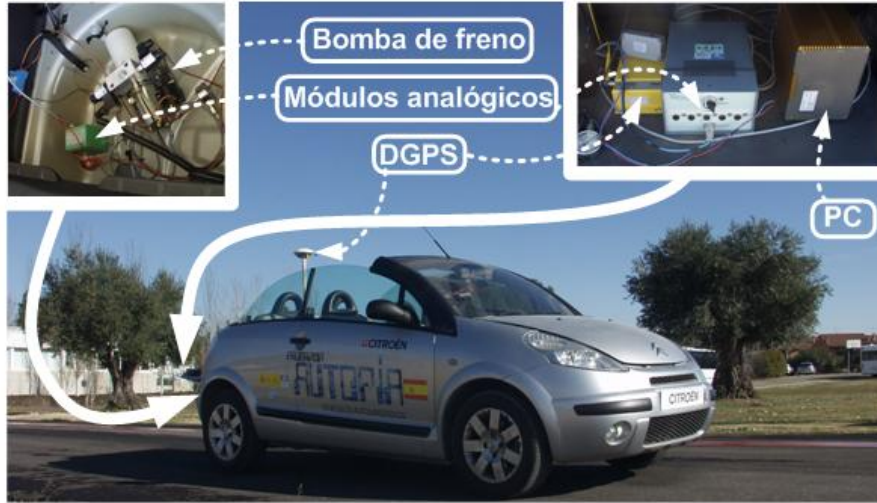


Figura 4.1: *Clavileño* con los dispositivos y actuadores embarcados

(Milanés et al., 2010a) se presenta una información más detallada de los sistemas hardware y software utilizados para el montaje de la bomba del freno.

La arquitectura de control implementada en *Clavileño* es análoga a la descrita en el capítulo 2, sección 2.4.3, con un GPS y una unidad inercial como principales sensores de posicionamiento. El primer controlador neuro-borroso (sección 4.5) ha utilizado la frecuencia del GPS (5 Hz) para definir el ciclo de control del sistema, mientras que para los segundos experimentos (sección 4.6), sin la salida incremental, se ha aumentado la frecuencia de muestreo hasta los 25 Hz, utilizando la señal que viene directamente desde el bus CAN del vehículo.

4.5. Control longitudinal con salida incremental

Como se ha mencionado anteriormente, en (Naranjo, 2005) y (Onieva, 2011) se han desarrollado controladores borrosos para el control de cruce en vehículos eléctricos y a gasolina, respectivamente. En ambos casos la salida generada por los controladores no actúa directamente sobre los pedales de los vehículos, sino a través de una etapa incremental que prioriza la acción sobre acelerador, según el esquema de la figura 4.2.

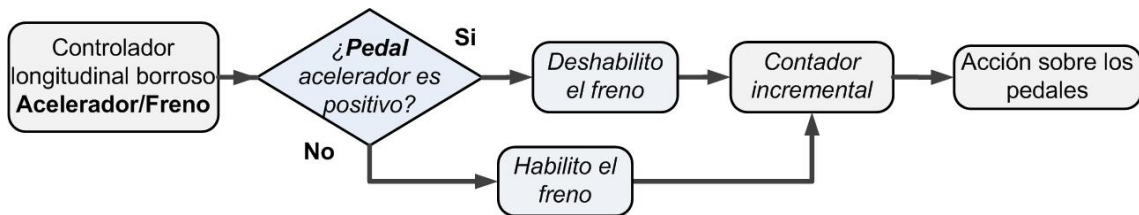
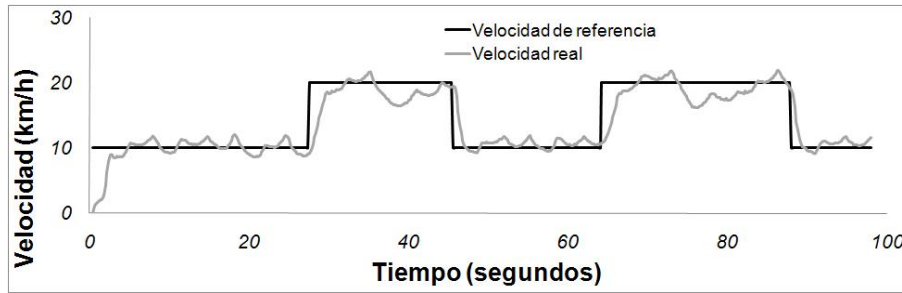
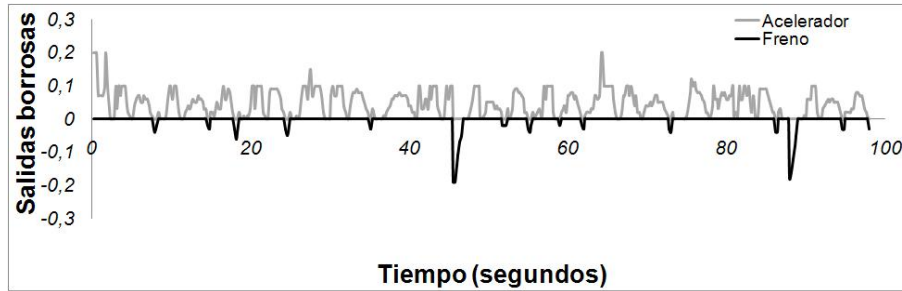


Figura 4.2: Estructura del control longitudinal con función incremental

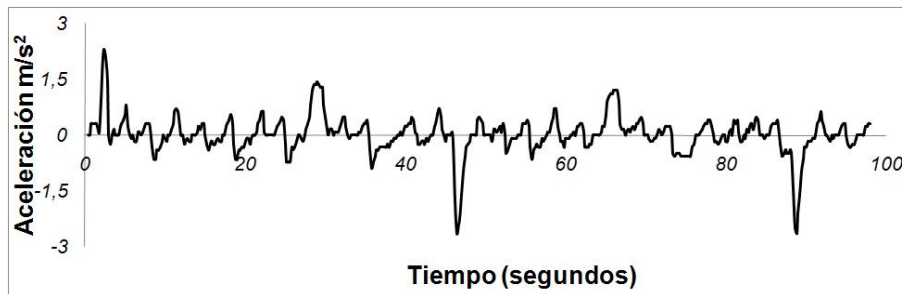
Cuando la salida del acelerador es negativa, entonces se habilita el pedal del freno. El propósito de esta condición es evitar la acción conjunta de ambos pedales. Posteriormente este valor de salida se suma al valor del bloque *contador incremental* (figura 4.2). El valor



(a) Velocidad del vehículo, experimento 1



(b) Salidas del controlador borroso, experimento 1



(c) Aceleración del vehículo, experimento 1

Figura 4.3: Experimento en las instalaciones del CAR con el controlador borroso de (Onieva, 2011)

de referencia va al pedal del acelerador o del freno¹, tras ser multiplicado por un factor proporcional que depende del número de bits de tarjeta analógica utilizada².

4.5.1. Controlador borroso

Las variables de entrada del controlador longitudinal son: *error de velocidad* y *aceleración*. La primera se define como la diferencia entre la velocidad longitudinal y la de referencia (km/h), mientras que la segunda es la aceleración (m/s^2) longitudinal.

La figura 4.3 muestra el comportamiento del vehículo con el controlador borroso propuesto en (Onieva, 2011), en un segmento de las instalaciones del CAR (sección 2.4). Se observan algunas perturbaciones que afectan el buen funcionamiento del controlador, debido a las pendientes (menores a cuatro grados de inclinación) y las curvas pronunciadas durante el recorrido.

Durante el experimento se han definido dos velocidades de referencia: 10 y 20 km/h. La

¹Si la salida es mayor o igual a cero: acelerador. Si es menor que cero: freno.

²256 para las furgonetas eléctricas, y 2048 para los vehículos a gasolina.

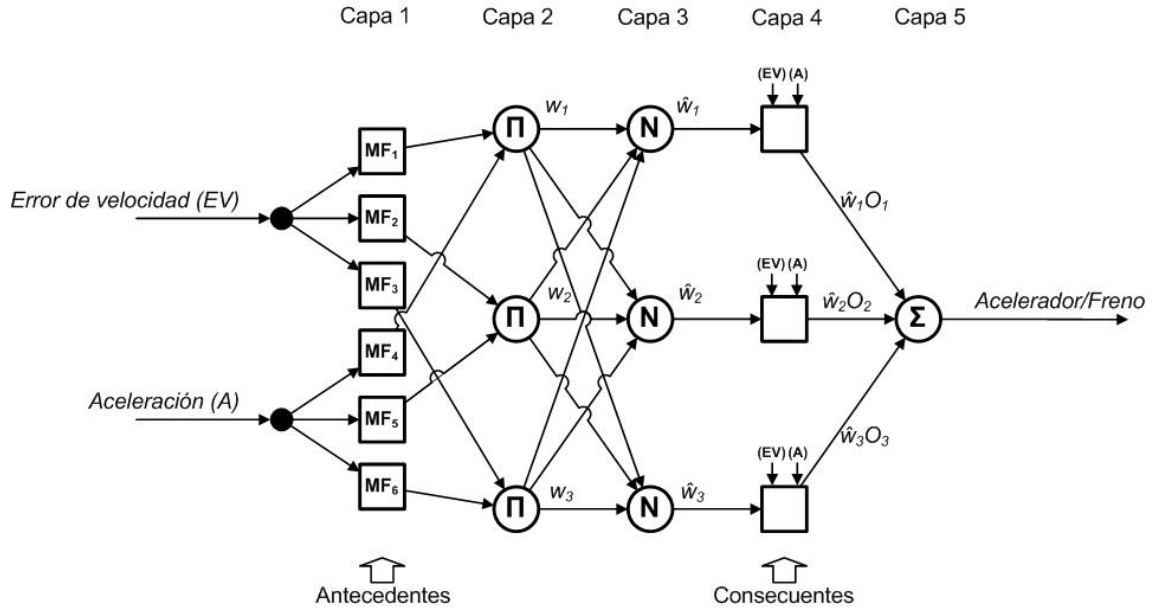


Figura 4.4: Arquitectura del sistema ANFIS para el control longitudinal

parte superior de la figura 4.3 muestra la velocidad longitudinal y la de referencia. Puede observarse que alrededor de los instantes 40 y 70, el vehículo circula en pendientes de subida, por ello el vehículo pierde potencia y aumenta el error con respecto de la velocidad de referencia.

Este controlador borroso tiene varias ventajas: bajo error, respuesta rápida y robustez. Sin embargo, este sistema de control puede ser mejorado desde el punto de vista de confort y el uso eficiente de los actuadores (v.g.: el freno se actúa varias veces aún cuando la velocidad de referencia se mantiene constante). El objetivo de esta sección es mejorar la respuesta del sistema aprovechando la experiencia de conductores. Por este motivo se implementará un sistema neuro-borroso.

4.5.2. Controlador neuro-borroso

El sistema de inferencia borrosa basado en redes neuronales adaptativas, conocido como ANFIS, es uno de los primeros sistemas neuro-borrosos desarrollados, en donde las reglas borrosas se obtienen a partir de datos y la experiencia que tenga del proceso (Jang, 1993). Su funcionamiento se basa en la extracción de reglas borrosas en cada nivel de una red neuronal. Utilizando la misma semántica que en los sistemas borrosos, en los sistemas ANFIS definen las reglas que aportan la información necesaria de cualquier sistema.

El sistema ANFIS generado en esta sección tiene dos variables de entrada: *error de velocidad* y *aceleración*, y una salida (*acelerador/freno*) (figura 4.4). Cada entrada tiene tres valores lingüísticos, lo que lleva a nueve reglas borrosas. La salida del controlador neuro-borroso está comprendida en un rango entre $[-1,1]$, donde los intervalos $[-1,0]$ y $[0,1]$ corresponde al freno y al acelerador respectivamente.

ANFIS se utiliza para introducir el conocimiento de operadores expertos en sistemas de reglas definido previamente. En este sentido, se han realizado recorridos con el controlador en lazo abierto, registrando los valores del error de velocidad y la aceleración. Debido a la complejidad que representa leer la posición del pedal, se han enviados instrucciones

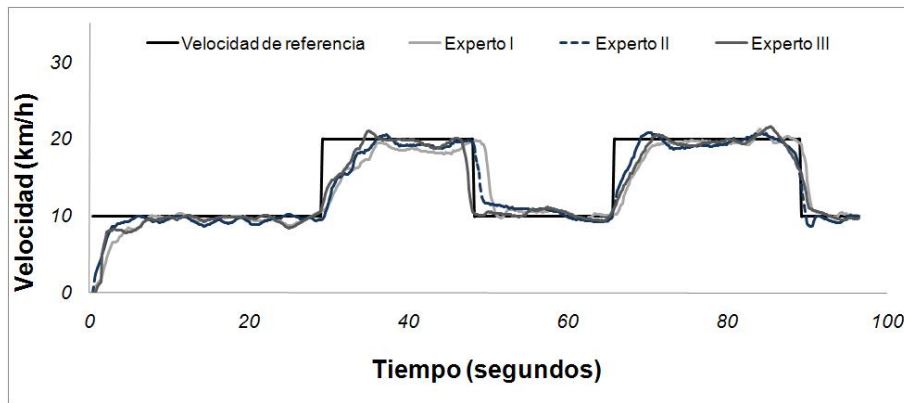


Figura 4.5: Experimentos con conductores expertos

desde el teclado del ordenador abordo, emulando el comportamiento que debía tener el conductor para cada velocidad. Los tres experimentos con conductores han recorrido el mismo trayecto utilizado para los experimentos presentados en la sección 4.5.1. La figura 4.5 muestra la velocidad en tres de los mejores experimentos utilizados para entrenar al sistema.

Los parámetros de entrenamiento empleados con el sistema ANFIS se resumen en la tabla 4.1, mientras que la tabla 4.2 muestra las reglas de control neuro-borroso generadas.

Algoritmo	ANFIS
<i>Sistema</i>	Multiple-entrada/Simple-salida
<i>Tipo de función de pertenencia</i>	trapezoidal
<i>Número de funciones de pertenencia</i>	3
<i>Tipo de Inferencia</i>	Takagi-Sugeno
<i>Número de reglas</i>	9
<i>Iteraciones</i>	500
<i>Ratio de aprendizaje</i>	0.001
<i>Algoritmo de entrenamiento</i>	Retropropagación + Mínimos cuadrados
<i>Conjunto de datos de entrenamiento</i>	987 muestras (2 experimentos)
<i>Conjunto de datos de validación</i>	1497 muestras (3 experimentos)

Tabla 4.1: Resumen de los parámetros del modelo ANFIS

Aceleración/Error de velocidad	Negativa	Central	Positiva
Negativo	0.2245	0.19	0.0884
Centro	0.006	0.09938	0.0108
Positivo	-0.101	-0.2186	-0.02014

Tabla 4.2: Reglas neuro-borrosas para la acción del acelerador y el freno

Los experimentos se llevaron a cabo en *Clavileño*, en las mismas condiciones que con el controlador borroso, esto es: las velocidades de referencia son 10 y 20 km/h, dentro del mismo recorrido.

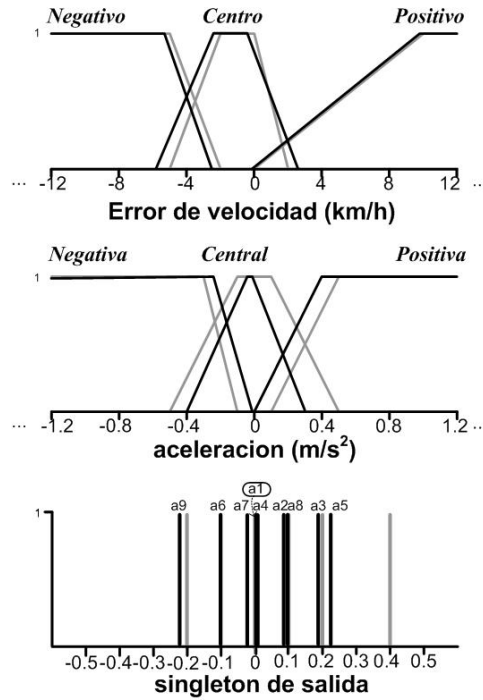


Figura 4.6: Funciones de pertenencia y de salida del controlador neuro-borroso comparadas con el controlador borroso desarrollado en (Onieva, 2011)

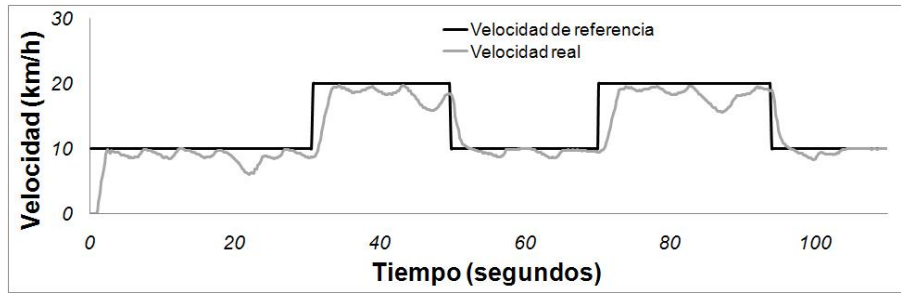
En la figura 4.6 se muestra una comparación entre las funciones de pertenencia de entrada y de salida del controlador borroso y el neuro-borroso. Las líneas negras muestran las nuevas funciones generadas por ANFIS, mientras que las líneas grises corresponden al controlador borroso. Como puede observarse, la aceleración es la variable que más cambia, ya que la función de pertenencia central cambia de trapezoidal a triangular.

La distancia total del recorrido es de 400 metros, y como se observó en la figura 4.3 existen dos tramos en pendientes. Es posible observar como el sistema ha aprendido de los conductores expertos (figura 4.5), ya que mantiene la velocidad cerca del límite, aunque sin rebasarlo. Además, no existen sobrepicos en la respuesta, haciendo que el sistema se comporte como un conductor experimentado debería hacerlo.

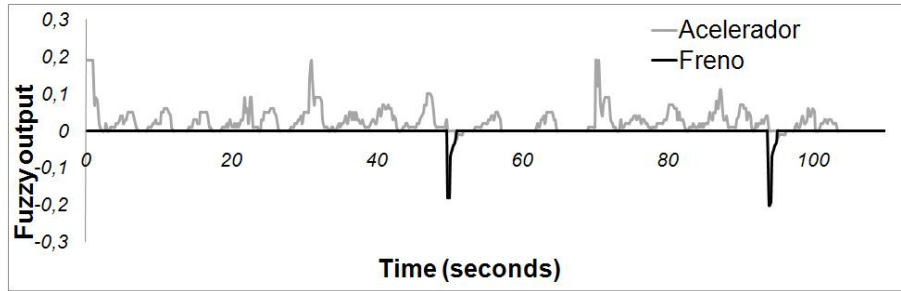
El paso del vehículo por los tramos en pendientes suceden en los segundos 50 y 80. El promedio de la velocidad ha disminuido en comparación con el controlador borroso. Esto se debe a que el controlador nunca supera la velocidad de referencia. En la tabla 4.3 se muestra un análisis comparativo con diferentes aspectos de las dos técnicas utilizadas.

En la parte central de la figura 4.7 se muestra la salida del controlador neuro-borroso. La línea gris muestra la acción sobre el acelerador, mientras que la negra muestra acción sobre el freno. Este controlador presenta un mejor funcionamiento en términos de eficiencia, ya que el motor consume menos combustible. En la tabla 4.3 se observa que el promedio de la salida del acelerador es de 0,0245, un 46,1 % menos que el controlador borroso.

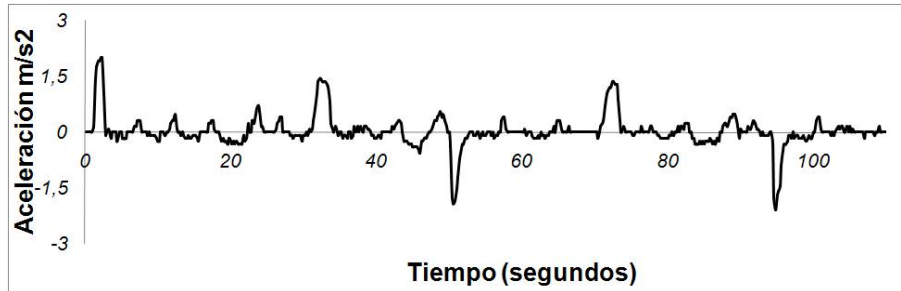
En la figura 4.3b se observa como el freno era utilizado para mantener la velocidad de referencia durante varios instantes en el recorrido. Mientras que en la salida del controlador en la figura 4.7b el freno solo es usado a los 50 y 95 segundos del recorrido, esto es, sólo cuando la velocidad de referencia disminuye. Esta salida presenta una disminución del 55,7 % en la acción en el pedal del freno (tabla 4.3). También la aceleración longitudinal disminuye, como puede observarse en la figura 4.7c. El promedio de ésta se ha reducido



(a) Velocidad del vehículo, experimento 2



(b) Salidas del controlador borroso, experimento 2



(c) Aceleración del vehículo, experimento 2

Figura 4.7: Experimento en las instalaciones del CAR con el controlador neuro-borroso generado

Criterio	Borroso	Neuro-borroso
Velocidad promedio -km/h-	13,75	12,52
Promedioa de la salida del acelerador	0,0454	0,0245
Promedioa de la salida del freno	0,00458	0,00203

Tabla 4.3: Valores de salida del controlador neuro-borroso

desde los $0,0498 \text{ m/s}^2$ hasta $0,0267 \text{ m/s}^2$, es decir, un 46,43 % menos, y por lo tanto mejora significativamente el confort para los pasajeros.

Estos primeros resultados han permitido ver las ventajas que presentan los sistemas neuro-borrosos para el control longitudinal en vehículos autónomos con motor a gasolina. Sin embargo, hasta ahora, la acción de control sobre los actuadores estaba limitada por una etapa incremental a la salida de controlador (para evitar saltos bruscos en el vehículo). Como se ha observado en (García et al., 2002; Naranjo, 2005; Onieva, 2011) esta etapa estaba justificado debido a que la frecuencia del ciclo de control estaba limitada por el

GPS a 200 ms (5 Hz). En los siguientes experimentos ésta frecuencia se ha aumentado gracias a la trama de datos que se lee desde el bus CAN del vehículo, hasta los 40 ms (25 Hz). Además se ha prescindido de la etapa incremental y se ha utilizado la salida directa generada por el controlador.

4.6. Comparación controladores a baja velocidad

Se han considerado diferentes requisitos para garantizar un análisis comparativo objetivo de las cuatro propuestas de control longitudinal que se presentan en esta sección. En este sentido, se ha asignado la prioridad a la comodidad de los ocupantes. Un consenso ampliamente aceptado en la comunidad de la automoción se encuentra en (Com, 2003), donde la aceleración máxima para el confort se ha establecido en 2 m/s^2 .

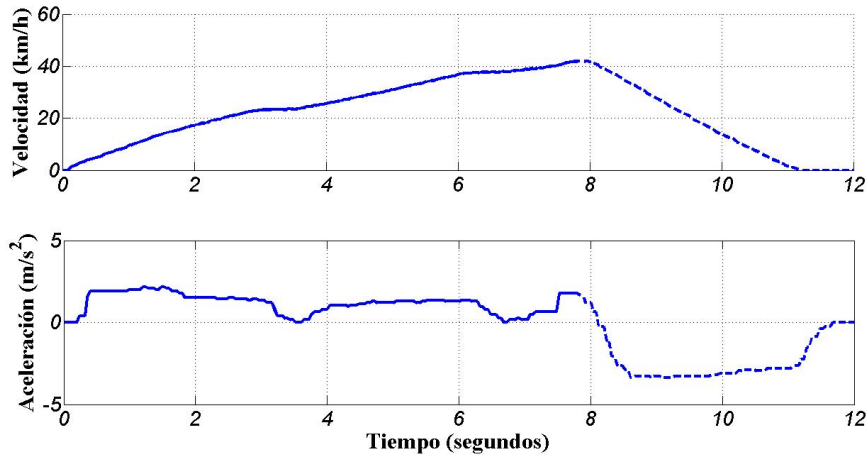


Figura 4.8: Comportamiento del vehículo con un conductor humano

Con esta referencia de confort, se realizaron varias pruebas con el fin de determinar la máxima aceleración y desaceleración que podría darse en el vehículo. Para el acelerador, un conductor humano ha llevado el vehículo que se encontraba parado presionando el acelerador completamente. El comportamiento del vehículo se muestra en la figura 4.8 (la línea sólida). En la parte superior e inferior se han representado la velocidad y la aceleración, respectivamente. Podemos observar que una vez superados los 15 km/h, la aceleración longitudinal es menor a los $1,5 \text{ m/s}^2$. Los valores de aceleración alrededor de cero corresponden al cambio de marcha del vehículo. Por lo tanto, en primera instancia, la aceleración del vehículo no supera la máxima aceleración de confort permitida, para todo el rango de acción del acelerador.

El sistema de frenado automático ha sido diseñado para frenadas de emergencia, y por ende desaceleraciones fuertes. En este sentido, se han medido experimentalmente las desaceleraciones utilizando diferentes valores de entrada, vía software, en el sistema de control para determinar cuáles cumplían los límites de confort. La línea punteada de la figura 4.8 muestra la velocidad y la desaceleración aplicando un 20 % de apertura de la electro válvula. En la parte inferior de la misma figura se observa como ésta llega a alcanzar valores alrededor de los -3 m/s^2 , con lo que los controladores se diseñaron para no superar estas condiciones.

Para calcular los valores de las variables de entrada de los controladores se han utilizado

los sensores embarcados en el vehículo y leídos desde el bus CAN. Específicamente, para medir la velocidad y la aceleración se ha utilizado un sensor diferencial de efecto Hall y un sensor piezoeléctrico, respectivamente. La velocidad de referencia es generada a través del programa de control embarcado en el vehículo. Estos controladores han sido diseñados para bajas velocidades (≤ 15 km/h). A continuación se presentan cada uno de los controladores que actúan directamente sobre los pedales (sin el contador incremental).

4.6.1. Controlador PI

Muchos de los controladores PID reducen su acción de control a la PI debido a que la acción derivativa puede ser innecesaria o difícil de sintonizar (Astrom et al., 1995). Los valores obtenidos para los parámetros de sintonía del PID reduciendo el error integral absoluto -IAE- se muestran en la tabla 4.4.

Controlador	K_{P_a}	K_{I_a}	α_a	K_{P_f}	K_{I_f}	α_f
PI	0,1	1	-	0,05	0,005	-
i-PI	0,1	1	80	0,05	0,005	100

Tabla 4.4: Parámetros de los controladores PI e i-PI

4.6.2. Controlador i-PI

El i-PID es un controlador proporcional integral derivativo que incorpora un término inteligente. Es importante aclarar que la nominación de inteligente usada aquí no está relacionada con las técnicas de inteligencia artificial, sino más bien con la capacidad que tiene de completar tareas que un regulador convencional no puede hacer. Para ello permite introducir un término extra al PID, para compensar los efectos ocasionados por perturbaciones y/o dinámicas no modeladas del sistema (Villagrà et al., 2010).

El controlador i-PI no necesita de un conocimiento exhaustivo de la dinámica del vehículo, al contrario, solo necesita conocer una característica básica, conocida o impuesta, para realizar una buena planificación de la trayectoria, y por ende, un control más eficiente y preciso. En nuestro caso utilizaremos el confort para planificar las trayectorias de referencia que permiten ajustarse al cambio de consigna deseado.

En (Fliess y Join, 2008) se explican todas consideraciones teóricas para el ajuste de los controladores PID inteligentes. Para esta aplicación se considera el caso más sencillo ($\mu = 1$), se resuelve la ecuación 4.1 y se acopla el controlador PI descrito en la sección anterior, la ley de control resultante tiene la forma:

$$F(t_k) = [y^{(\mu)}(t_k)]_e + \alpha u(t_{k-1}) \quad (4.1)$$

$$u = \frac{1}{\alpha}(\dot{V}_S - F) + K_P e + K_I \int e dt, e = V_x - \dot{V}_S \quad (4.2)$$

donde K_P y K_I son las ganancias del controlador PI (tabla 4.4)

La ecuación 4.2 puede particularizarse para el caso del control del acelerador:

$$u_a(t_k) = \frac{1}{\alpha_a}(\dot{V}_S(t_k) - F_a(t_k)) + K_{P_a} e(t_k) + K_{I_a} \int e(t_k) dt, \quad \text{con} \quad F_a(t_k) = \gamma_x(t_k) - \alpha_a u_a(t_{k-1}) \quad (4.3)$$

Y del mismo modo para el freno:

$$u_f(t_k) = \frac{1}{\alpha_f} (\dot{V}_S(t_k) - F_f(t_k)) + K_{P_f} e(t_k) + K_{I_f} \int e(t_k) dt, \quad \text{con} \quad F_f(t_k) = \gamma_x(t_k) - \alpha_f u_f(t_{k-1}) \quad (4.4)$$

donde $\gamma_x(t_k) \approx \dot{V}_x(t_k)$ es la aceleración longitudinal leída del bus CAN del vehículo.

Finalmente, se ha establecido un algoritmo de decisión para determinar cuándo debe aplicarse cada acción de control. La ley de control de la ecuación 4.4 será implementada si disminuye la velocidad de referencia. Para el resto de casos, la acción de control utilizada será la indicada en la ecuación 4.3. Es importante notar que las ganancias óptimas del PI y del i-PI son idénticas. El parámetro α del i-PI, el mismo para el acelerador y el freno, ha sido obtenido manualmente utilizando los parámetros del PI descrito en el punto 4.6.1.

4.6.3. Controlador borroso con salida absoluta

Partiendo de los controladores borrosos explicados en la sección 4.5.1 se ha ajustado un nuevo controlador utilizando la salida que actúa directamente sobre los actuadores. En (Milanés, 2010) se ha sustituido la entrada de la aceleración por la velocidad longitudinal del vehículo. Esto ha permitido evitar las oscilaciones asociadas a la aceleración, y que podría repercutir en la acción sobre los pedales, ya que ahora no existe ninguna etapa de filtrado (contador incremental, figura 4.2) que evite cambios bruscos en la referencia. Además, esta nueva variable mantiene la aceleración de confort debajo de los valores máximos (2 m/s^2), según se mostró en la figura 4.8, en función de las velocidades iniciales y los cambios de referencia.

Para el proceso de sintonía del controlador borroso se ha tenido en cuenta la experiencia humana, según los diferentes experimentos previos. Finalmente, un ajuste más minucioso se realizó por un procedimiento de ensayo y error. Ambas entradas tienen tres etiquetas lingüísticas asociadas, según se explica a continuación:

- **Error de velocidad:** la etiqueta *Negativo* representa los casos en los que la velocidad es mayor que la velocidad de referencia. La etiqueta *Positivo* expresa el caso contrario, por lo tanto es usada para presionar el acelerador. Finalmente, la etiqueta *Centro* incluye los valores donde el error de velocidad es cercano a cero. En la figura 4.9 se muestran las funciones de pertenencia.
- **Velocidad longitudinal:** el rango de definición de las funciones de pertenencia de la velocidad está en consonancia con el hecho de que el controlador borroso ha sido diseñado para bajas velocidades. La etiqueta *Poca* representa a velocidades inferiores a los 7 km/h. La etiqueta *Alta* alcanza su valor máximo para velocidades entre 15 y 40 km/h. La función de pertenencia para valores centrales se denomina *Media*.

Las variables de salida ha sido definidas de forma análoga a la explicada en el capítulo 3, según la terminología de ORBEX (sección 2.4.2). Este controlador borroso tiene definida una salida única, la cual determina la magnitud de la acción de control, así como el actuador que debe utilizarse. Los valores posibles están definidos en un rango de $[-1 \ 1]$, donde -1 indica el máximo valor posible para el freno, mientras que 1 es el equivalente para el acelerador. El cero establece el umbral de acción de cada actuador. Estos valores fueron estimados experimentalmente y están asignados a cada regla del controlador (tabla 4.5).

La principal ventaja que presenta este controlador es su facilidad a la hora de ajustarlo, debido a las reglas intuitivas destinadas a imitar a los conductores humanos.

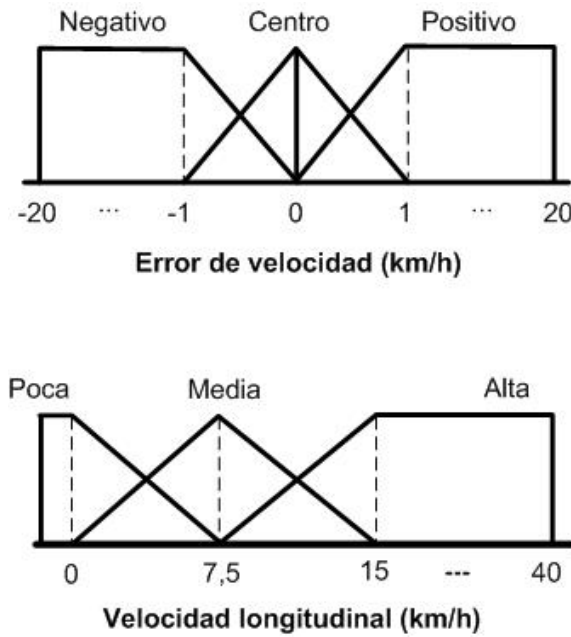


Figura 4.9: Funciones de pertenencia del controlador borroso con salida absoluta

	Error de Vel. (km/h)		
Vel.(km/h)	Neg.	Centro	Pos.
Poca	-0,08	0,15	0,3
Media	-0,1	0,2	0,35
Alta	-0,15	0,25	0,4

Tabla 4.5: Reglas borrosas para el control de cruceo a bajas velocidades

4.6.4. Controlador neuro-borroso con salida absoluta

Se ha implementado un controlador neuro-borroso y se ha ajustado partiendo de un mayor número de datos para el entrenamiento de la red neuronal y de los resultados obtenidos por los mejores controladores hasta ahora diseñados. Puesto que los controladores neuro-borrosos necesitan partir de una buena base de entrenamiento, se han utilizado las entradas y las salidas dadas por los controladores i-PI y el borroso, los cuales han sido explicados anteriormente.

Específicamente, se ha considerado el comportamiento en estado estacionario del i-PI, mientras que el entrenamiento en la fase transitoria se ha realizado con el controlador borroso. Posteriormente se han seleccionado los mejores recorridos obtenidos para re-entrenar estos controladores iniciales, generados según el método descrito en la sección 4.5.2. Los parámetros del sistema ANFIS utilizados son análogos a los descritos en la tabla 4.1, salvo por el número de reglas (ahora 27), relacionados con las nuevas funciones de pertenencia utilizadas.

A diferencia de los sistemas borrosos ajustados manualmente, los sistemas neuro-borrosos permiten sintonizar sistemas más complejos con un mayor número de variables. En este sentido, se han utilizado tres variables de entrada: el error de velocidad, la aceleración y la velocidad longitudinal, con la finalidad de obtener un controlador más preciso

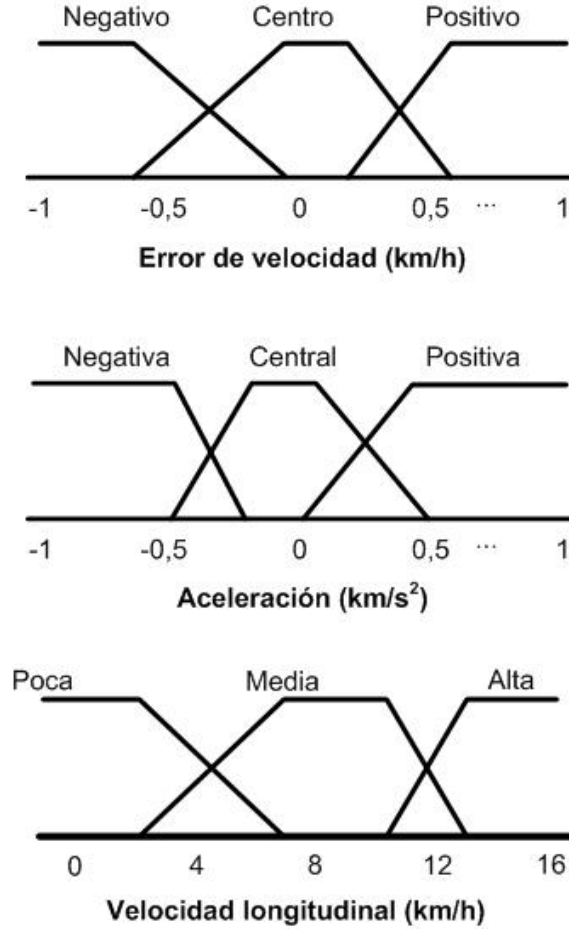


Figura 4.10: Funciones de pertenencia del controlador neuro-borroso con salida absoluta

que el obtenido en las secciones 4.5.1 y en 4.6.3. En la figura 4.10 se muestran los valores obtenidos con ANFIS.

Combinando las nueve etiquetas se obtiene un total de 27 reglas. En la tabla 4.6 está representada la base de reglas obtenida.

Para evaluar el comportamiento de los cuatro controladores propuestos en esta sección se ha utilizado el modelo dinámico del vehículo presentado en (Villagrà et al., 2010). Este modelo tiene en cuenta las dinámicas de los neumáticos, el motor y el freno. Además, para simular el ruido de las medidas de los sensores embarcados, que se leen a través del bus CAN, se ha añadido una señal de ruido blanco Gaussiano, a la medida de la velocidad y la aceleración, expresado en $V_{x_m} = V_x + N(0, \sigma)$, $\sigma = 10^{-4}$ y $\gamma_{x_m} = \gamma_x + N(0, \sigma)$, $\sigma = 10^{-3}$, respectivamente (Milanes et al., 2012).

Con el objetivo de analizar el comportamiento de los controladores se han simulado varios cambios de velocidad. En la figura 4.11a se muestra el seguimiento de esta referencia de velocidad utilizando las cuatro técnicas de control descritas previamente. En la parte central de misma figura se observa la salida normalizada entre $[-1 \ 1]$. Finalmente en la parte inferior (figura 4.11c) se muestra la evolución de la aceleración.

El 80 % las reglas obtenidas en el controlador neuro-borroso presentan un buen comportamiento para las salidas relacionadas con el acelerador. Sin embargo, se realizaron algunas correcciones manuales con las salidas del freno (las que tiene valores negativos), ya

Error de velocidad <i>Negativo</i>			
	Aceleración		
Velocidad longitudinal	<i>Negativa</i>	<i>Central</i>	<i>Positiva</i>
<i>Poca</i>	-0,083	-0,072	-0,091
<i>Media</i>	-0,121	-0,062	-0,117
<i>Alta</i>	-0,16	-0,127	-0,13
Error de velocidad <i>Centro</i>			
	Aceleración		
Velocidad longitudinal	<i>Negativa</i>	<i>Central</i>	<i>Positiva</i>
<i>Poca</i>	0,13	0,096	0,117
<i>Media</i>	0,111	0,087	0,123
<i>Alta</i>	0,18	0,23	0,26
Error de velocidad <i>Positivo</i>			
	Aceleración		
Velocidad longitudinal	<i>Negativa</i>	<i>Central</i>	<i>Positiva</i>
<i>Poca</i>	0,198	0,241	0,244
<i>Media</i>	0,281	0,306	0,355
<i>Alta</i>	0,345	0,451	0,47

Tabla 4.6: Reglas neuro-borrosas obtenidas a través de ANFIS

que en muchos casos éstas obtenían valores muy altos (por encima del 20 % de la capacidad del freno). Estos últimos ajustes permitieron que el controlador neuro-borroso presentara resultados más realistas.

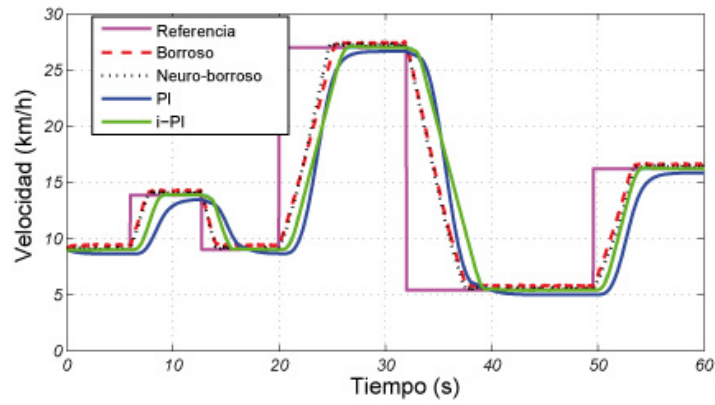
En líneas generales los cuatro controladores cumplen con los prerequisites de diseño, una aceleración por debajo del valor máximo establecido para una conducción confortable. Sin embargo, es conveniente destacar algunas diferencias:

- La respuesta transitoria de los controladores evoluciona más lentamente para los que están basados en el método PI, mientras que es más rápida para los controladores basados en lógica borrosa. Esto se debe a que los primeros utilizan una aceleración limitada, mientras que los segundos utilizan la velocidad de referencia final.
- La respuesta transitoria es satisfactoria para tres controladores, exceptuando el PI. Sin embargo, el controlador i-PI es el que tiene mayor precisión, en comparación con el controlador borroso y el neuro-borroso.
- La salida de los controladores borroso y neuro-borroso es ligeramente más oscilante en estado estacionario que la de los controladores basados en control clásico.

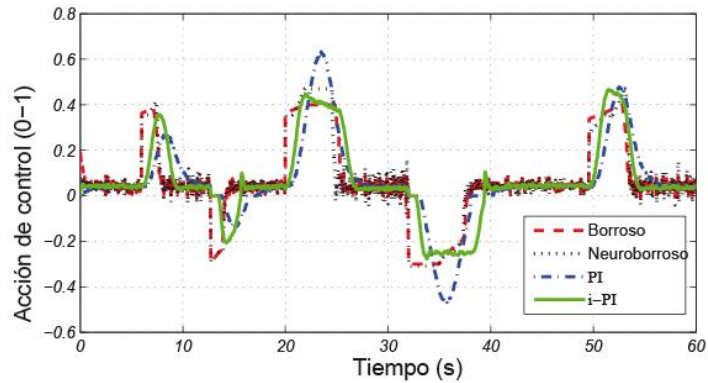
Se han realizado diferentes cambios de consignas en intervalos de 30 segundos. Todos ellos a baja velocidad, ya que es el objetivo de esta sección. Para evitar el efecto del cambio de marcha se han mantenido en todo momento la primera marcha.

La figura 4.12 muestra los resultados de cada uno de los controladores. La figura 4.12a muestra la velocidad del vehículo en función de la velocidad deseada. En la grafica central se muestra la acción de control normalizada sobre los pedales. Y en la parte inferior de la misma figura se muestra la aceleración, la cual permite validar el nivel de confort.

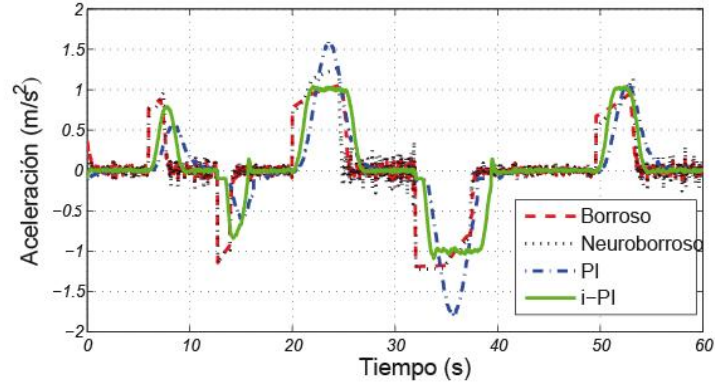
Para cuantificar estos resultados se han utilizado tres criterios diferentes: el error absoluto de velocidad, el coste computacional, y la suavidad de la acción de control. Los



(a) velocidad del vehículo



(b) Salida normalizada de los controladores

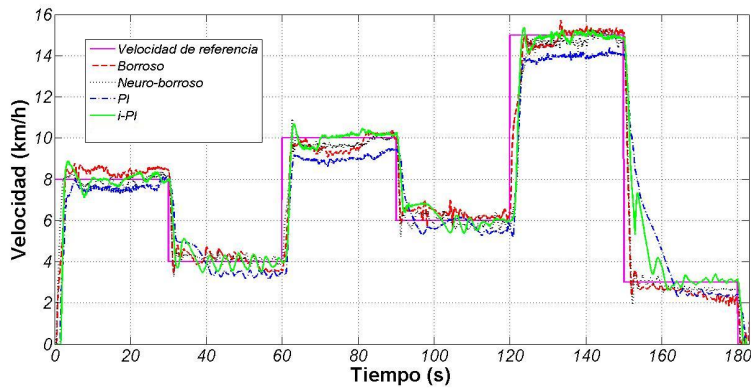


(c) Aceleración del vehículo

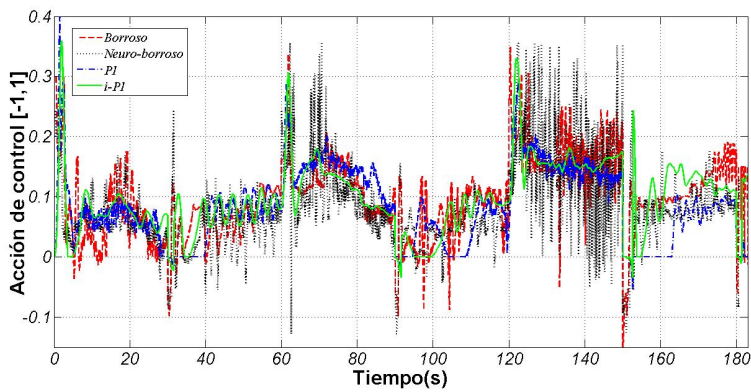
Figura 4.11: Simulación de los cuatro controladores longitudinales

primeros pueden calcularse directamente a partir de las mediciones hechas, mientras que el último es una estimación de la frecuencia media de la acción de control con una transformada rápida de Fourier -FFT-.

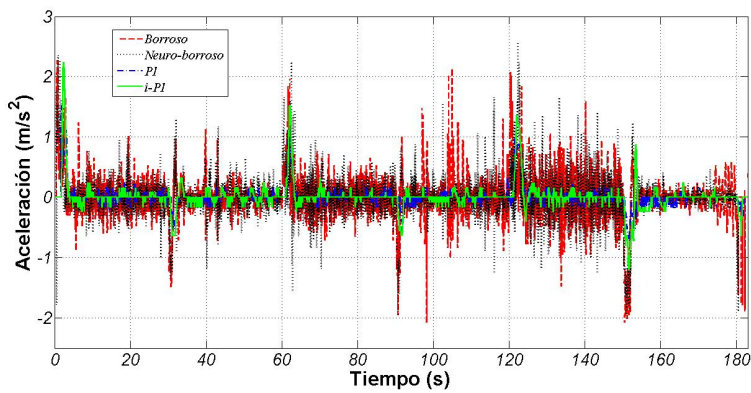
También se han considerado otros dos factores en la medición: el valor máximo de la señal y la mediana, para tener un buen indicador de la acción de control global al dar menor importancia a los valores fuera de rango. Por último, para validar el comportamiento en el seguimiento de la velocidad de referencia (el error absoluto en estado estacionario) se han



(a) velocidad del vehículo



(b) Salida normalizada de los controladores



(c) Aceleración del vehículo

Figura 4.12: Experimentos reales con los cuatro controladores embarcados en el vehículo

utilizado el error medio y mediana. En la tabla 4.7 se muestran todos estos parámetros en función de cada uno de los controladores utilizados.

Como puede observarse en la figura 4.12 el comportamiento del PI es inaceptable, ya que no pudo alcanzar la velocidad de referencia en todo el recorrido. Esto se ve reflejado en la tabla 4.7 donde el controlador PI es el único que supera la unidad en el error medio. El comportamiento del i-PI es muy bueno para cambios positivos en la referencia, tanto en estado transitorio como en estacionario. Este controlador necesita mayor tiempo para al-

Controlador	Acción de cont.		Error (km/h)		Coste comp. medio (s)
	FFT mediana	max	media	mediana	
PI	$1,20 \cdot 10^{-4}$	0,39	1,188	0,660	$4,13 \cdot 10^{-6}$
i-PI	$1,24 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,716	0,190	$3,77 \cdot 10^{-6}$
Borroso	$3,07 \cdot 10^{-4}$	0,35	0,629	0,360	$3,71 \cdot 10^{-6}$
N-Borroso	$6,89 \cdot 10^{-4}$	0,35	0,543	0,250	$6,60 \cdot 10^{-6}$

Tabla 4.7: Comparación entre los controladores

canzar los cambios de referencia negativos, ya que la regla de conmutación entre acelerador y freno dificulta un control más preciso en las disminuciones de velocidad.

El controlador borroso mejora los resultados para cambios de referencia negativos, aunque presenta ligeras fluctuaciones en estado estacionario. Esto se debe a que el controlador nunca se estabiliza del todo, ya que siempre existen perturbaciones que hacen que se encuentre saltando entre dos o más reglas borrosas. El controlador neuro-borroso corrige estas fluctuaciones. Este controlador presenta el menor error promedio, aunque no logra superar al i-PI en el valor de la mediana. La acción más suave la presenta el i-PI, y esto se ve reflejado a su vez en la aceleración del vehículo (tabla 4.7).

Finalmente, el coste computacional medio es muy similar para los cuatro controladores. El Controlador neuro-borroso presenta un valor ligeramente más elevado.

Capítulo 5

Resultados experimentales

*No hay felicidad que iguale a la tranquilidad de
conciencia*

Ibn Bayya/Avempace

5.1. Introducción

Con el objetivo de verificar el funcionamiento de la arquitectura de control presentada en esta tesis (sección 2.4.3), y haciendo especial énfasis en cada una de las aportaciones mencionadas en el capítulo 1 (figura 2.1), se ha realizado una serie de experimentos que permiten validar el funcionamiento del sistema. Esta arquitectura permite mejorar las capacidades del control lateral y longitudinal de los vehículos, según las aportaciones explicadas en los capítulos 3 y 4 respectivamente. Estos experimentos cubren un gran abanico de maniobras y escenarios reales, donde se ha utilizado: comunicación con otros vehículos, infraestructura y diferentes periféricos embarcados en cada uno de los vehículos.

Un primer grupo de experimentos ha sido diseñado para probar las diferentes maniobras en entornos urbanos, dentro de las pistas de pruebas del CAR (sección 2.4). Así se presenta un sistema que permite realizar adelantamientos en carreteras de doble sentido de forma segura, considerando en todo momento la posición y la velocidad de los otros vehículos involucrados en la maniobra (sección 5.2). Posteriormente se presenta un sistema de control de cruceo inteligente -ICC-, basado en el controlador explicado en el capítulo 4, que permite cambiar la velocidad de consigna en función del tipo de tramo por el cual circula el vehículo, a través de una red de sensores RFID distribuidos en el entorno (sección 5.3). El tercer experimento es un test de la arquitectura de control lateral en cascada, descrita en el capítulo 3; en una primera parte, se hace el movimiento marcha atrás, y posteriormente se implementa la salida de calles bloqueadas utilizando las comunicaciones con la infraestructura descritas en la sección previa (5.4). Seguidamente, se ha desarrollado una de las maniobras menos estudiada en la literatura de los sistemas ITS: la conducción autónoma de vehículos en rotondas, considerando diferentes casos de uso, entradas y salidas, cambios de carril y de velocidad (sección 5.5).

En el segundo grupo de experimentos sólo se han utilizado vehículos de gasolina, ya que las pruebas han sido realizadas en escenarios reales y a velocidades superiores. Se presentan experimentos de conducción autónoma a altas velocidades, ajustando los controladores borrosos del volante, explicados en el capítulo 3, para estas nuevas condiciones; finalmente, y basándonos en los trabajos previos dentro del grupo, así como en los controladores borrosos descritos en el capítulo 4 de esta tesis, se describe la participación del equipo

AUTOPIA en la primera competición europea de vehículos autónomos: el GCDC 2011, realizada en una autovía holandesa, entre Helmond y Eindhoven.

Todas estas maniobras muestran la versatilidad de la arquitectura de control para vehículos autónomos presentada en esta tesis, validándola en diferentes tipos de vehículos (eléctricos y a gasolina), así como en entornos urbanos y en autovías. La modularidad de la arquitectura de control permite incorporar de forma sencilla nuevos periféricos, como: sensores para la percepción, comunicación con la infraestructura y otros vehículos, y la acción sobre nuevos actuadores (palanca de cambios y luces de freno, entre otros). Los controladores borrosos son el núcleo de la arquitectura; su intuitiva sintonización y su fácil implementación permiten reducir la brecha que existe, hoy día, entre los sistemas inteligentes de transporte y los conductores humanos, tanto en entornos urbanos como en autovías.

5.2. Adelantamiento con tres vehículos

Las investigaciones llevadas a cabo para el control de vehículos autónomos en maniobras cooperativas están en la vanguardia de los ITS. Ejemplos de esta cooperación se plasman en intersecciones, ACC y adelantamientos, entre otros. Los adelantamientos requieren especial atención en un entorno variable, y sobre todo en carreteras de doble sentido si se aproxima un vehículo de frente. En la siguiente sección se plantea un algoritmo de decisión, un sistema de comunicaciones entre tres vehículos y un controlador borroso para la conducción de un vehículo en una maniobra de adelantamiento (Pérez et al., 2010a). Se han considerado diferentes casos de uso en función de las necesidades (abortar, o terminar la maniobra) y condiciones de circulación (tráfico de frente o no) en una carretera de doble sentido. Los resultados obtenidos demuestran que, basándonos en el conocimiento humano, se pueden ajustar controladores borrosos para la conducción autónoma de vehículos en maniobras de alto riesgo (Pérez et al., 2011a).

5.2.1. Trabajos previos

La automatización de vehículos comerciales, con el paso del tiempo, se está convirtiendo en una realidad cada vez más patente. Diferentes fabricantes y grupos de investigación alrededor del mundo vuelcan sus esfuerzos en desarrollar sistemas que permitan mejorar la conducción bien en zonas urbanas, o bien en autovías (Shladover, 1995). Las investigaciones en maniobras cooperativas entre vehículos autónomos es una de las apuestas más arriesgadas dentro del campo de los ITS, y el adelantamiento entre vehículos adquiere especial interés (Shamir, 2004). Si consideramos el caso de una carretera de doble sentido, la dificultad se incrementa considerablemente.

En España, el 91 % de las carreteras son de doble sentido. Según la Dirección General de Tráfico - *DGT* -, los conductores han dejado de correr en las autovías, para hacerlo en las carreteras secundarias (DGT, 2009). Mientras la siniestralidad ha descendido un 27 % en las redes principales, ha crecido un 100 % en las secundarias. Estos datos son alarmantes, ya que las cifras nos revelan que en 2009 hubo un total de 88.251 accidentes en carreteras secundarias con víctimas en España. Muchas veces los conductores no pueden percibir con claridad si viene un vehículo en sentido contrario, sobre todo cuando están próximos a una curva o hay problemas de visibilidad. Más del 95 % de estos accidentes son debidos a la poca visibilidad y mala estimación de la distancia a las curvas, así como con otros vehículos, por parte de los conductores ¹.

¹<http://www.dgt.es/portal/es/seguridad-vial/estadistica/publicaciones/princip-cifras-siniestral/>

El adelantamiento es una maniobra de alto riesgo, ya que las decisiones que se toman en su ejecución no dependen únicamente del vehículo que adelanta, sino de otras muchas variables como los factores ambientales, las condiciones del entorno, la distancia del vehículo a curvas e intersecciones, la posición y velocidad de los otros vehículos, entre otras. Además, la velocidad de los vehículos involucrados en un adelantamiento puede variar repentinamente. Mención aparte merece la dinámica del vehículo, sobre todo considerando el contacto entre el neumático y el suelo (Smith y Starkey, 1995) que condiciona mucho la ejecución de la maniobra.

La acción básica para realizar un adelantamiento es el cambio de carril. En (Jula et al., 2000) se definen las diferentes situaciones para realizar un cambio de carril seguro. En (Rajamani et al., 2000) se presentan algunos de los avances del programa PATH, considerando el control longitudinal y lateral de una flota de vehículos en caravana por autopistas. En (Hessburg y Tomizuka, 1994) presentan controladores borrosos para el volante aplicados al cambio de carril, usando la aceleración lateral, el error de la aceleración y la distancia a la línea de referencia. En Japón, el laboratorio de Investigación en vehículos de Nissan Motor ha desarrollado un sistema llamado LKS (*Lane Keeping Support*), que permite controlar, utilizando como entrada el par del volante, un servo motor acoplado a la dirección (Shimakage et al., 2001), para seguir la referencia.

Por otra parte, se necesitan comunicaciones fiables para realizar las maniobras cooperativas. En este sentido, la universidad de Tsukuba ha desarrollado un algoritmo para la transmisión de datos entre vehículos, probándolos en maniobras como el cambio de carril (Uno et al., 1999; Sakaguchi et al., 2000). Otros avances en el desarrollo de plataformas para la comunicación de sistemas de tráfico inteligentes se encuentra en el proyecto SPITS, cuyos resultados muestran las capacidades de las comunicaciones para la monitorización e implementación de maniobras cooperativas, entre una gran flota de vehículos (Koenders, 2011).

Otros autores han simulado adelantamientos con diferentes técnicas, como aprendizaje reforzado con múltiple objetivo (Ngai y Yung, 2007). Dentro del programa AUTOPÍA se han desarrollado simulaciones para verificar diferentes estrategias para la toma de decisiones en maniobras de adelantamiento con tres vehículos (Alonso et al., 2007). A partir de un módulo de realidad virtual y de un modelo simplificado del vehículo se construyó un simulador en el cual el vehículo transita por las diferentes fases del adelantamiento mediante un diagrama de flujo, utilizando como controlador base un módulo de inferencia borrosa. Si bien los controladores borrosos obtenidos no son directamente trasladables a los vehículos reales debido a la gran diferencia entre sus modelos, las estrategias de control a alto nivel han servido como punto de partida para el trabajo presentado a continuación. Por otra parte, en (Naranjo et al., 2008) se han realizado adelantamiento con vehículos reales, pero únicamente considerando dos vehículos, circulando en el mismo sentido.

Asimismo, los avances más importantes en implementación de maniobras con vehículos autónomos reales se muestran en el *DARPA Urban Challenge* (Kammel et al., 2007). El equipo de la Universidad de Stanford logró el segundo lugar en la última edición, realizando con éxito adelantamientos a 48 km/h. Para ello el vehículo estaba equipado con cinco láseres frontales, dos sistema de posicionamiento global diferencial, sistemas inerciales y tres ordenadores conectados en paralelo (Montemerlo et al., 2009).

La filosofía del grupo AUTOPÍA es realizar maniobras de control de vehículos autónomos afectando lo menos posible al entorno de trabajo, y esto también incluye a los vehículos. Usando controladores borrosos embarcados, un GPS diferencial, una unidad inercial y comunicaciones inalámbricas entre vehículos, se han desarrollado diferentes algoritmos, utilizando uno o dos vehículos (Milanés, 2010).

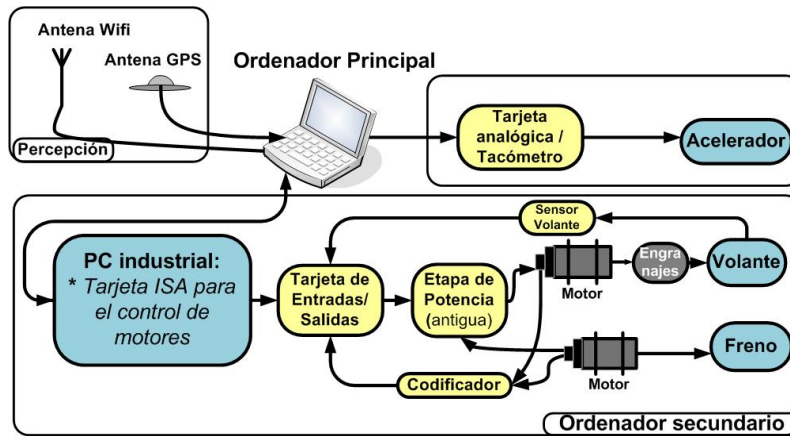


Figura 5.1: Arquitectura de control de *Rocinante*

Los controladores borrosos han sido utilizados ampliamente en el control de vehículos autónomos y robots móviles (Sugeno y Nishida, 1985; Fraichard y Garnier, 1997; Driankov y Saffiotti, 2001). Sugeno publicó en 1985 sus trabajos sobre el control de vehículos autónomos, demostrando que los motores de inferencia borrosa son una alternativa viable para realizar esta labor.

En esta sección se explican el procedimiento para hacer adelantamientos con tres vehículos en carreteras de dos carriles y de doble sentido con tráfico de frente. Los experimentos involucran hasta tres vehículos comunicados entre sí; el que realiza el adelantamiento está en modo autónomo y los otros se conducen manualmente. El experimento se ha diseñado así para verificar que el sistema de control puede manejar situaciones cambiantes que no puede controlar, ya que depende de la voluntad de los conductores humanos. El controlador del vehículo autónomo valora en cada momento del adelantamiento, si éste puede proseguir o hay que abortarlo.

A continuación, se detallan el resto de secciones de este capítulo. En primer lugar la explicación del escenario de pruebas, la maniobra de adelantamiento, sus diferentes fases, variables consideradas y los casos de uso utilizados en los experimentos. Luego, se explica el controlador borroso utilizado para controlar el vehículo. Finalmente, se explican los experimentos realizados. Las conclusiones de ésta, se explican en el siguiente capítulo.

5.2.2. Vehículos utilizados y escenario de pruebas

En los experimentos con adelantamientos se han utilizado tres vehículos: uno en modo de conducción autónomo y dos guiados por conductores humanos (modo manual). Es conveniente notar que utilizar vehículos conducidos en modo manual confiere generalidad al experimento aunque lo dificulta, pues los vehículos manuales hacen que el escenario de la maniobra sea impredecible. A continuación se resumen las características de cada uno de los vehículos utilizados y de la zona de conducción.

El vehículo autónomo utilizado es *Rocinante*, una de las furgonetas eléctricas del grupo AUTOPÍA (sección 2.4.1). El sistema de control lee del tacómetro la velocidad instantánea del vehículo, mientras que la posición se obtiene desde un receptor GPS diferencial. La acción sobre el volante se ejerce a través de un motor acoplado a la barra de dirección del vehículo. Es importante mencionar que el control lateral en cascada, explicado en el capítulo 3, ha sido desarrollado después de los siguientes experimentos en la otra furgoneta



Figura 5.2: Pistas de pruebas en el CAR. Longitud máxima de 220 metros

(*Babieca*). La diferencia principal entre ambas es que el control lateral de la primera está basado solo en la posición del volante, y no considera la velocidad angular, y que el sistema de freno utiliza un motor DC acoplado al pedal del vehículo.

La arquitectura de control está separada en dos niveles y se implementa en dos ordenadores conectados en red (Godoy, 2008). En el primero se realiza el tratamiento de los datos sensoriales, el control de alto nivel y la acción sobre el acelerador, mientras que el segundo se encarga del control de bajo nivel de los motores del freno y del volante, según muestra la figura 5.1.

Los vehículos no autónomos utilizados en estos experimentos son *Clavileño* y *Platero* (sección 2.4.1). Están instrumentados con un PC embarcado, un GPS, un sistema inercial y un sistema de comunicaciones. De esta forma, aunque se conducen manualmente, pueden proporcionar su posición, velocidad y otras variables de interés a los vehículos involucrados en la maniobra (Pérez et al., 2009)..

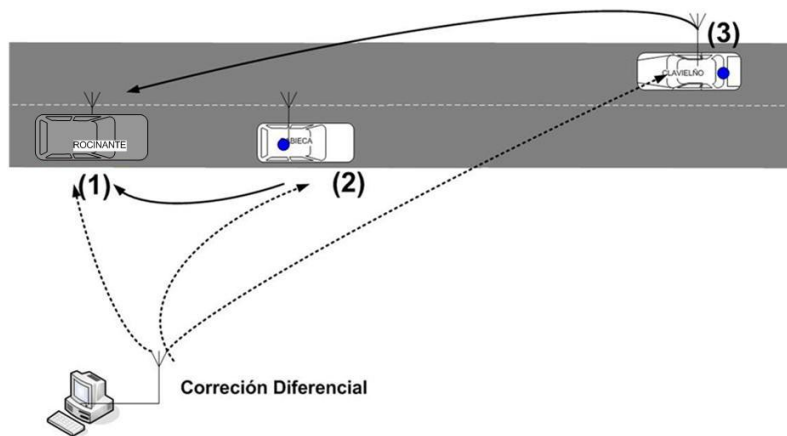


Figura 5.3: Comunicación entre vehículos y corrección diferencial

En la figura 5.2 se muestra el circuito de pruebas del CAR. Los experimentos de adelantamiento con tres vehículos se han realizado en el tramo recto más largo del circuito, de unos 220 metros, lo cual limita la velocidad máxima, a 30 km/h aproximadamente.

Para la comunicación entre vehículos se han utilizado tarjetas inalámbricas conectadas a una red de área local - WLAN -. El esquema de comunicaciones implementado se muestra en la figura 5.3. El enlace de comunicaciones es punto a punto con un servidor ubicado en la estación base y considerando vehículos como clientes de dicho servidor. En (Pérez et al., 2008) se detalla el sistema de comunicación implementado.

5.2.3. Maniobra de Adelantamiento

El adelantamiento entre vehículos consiste en que uno de ellos rebasa la posición de otro más lento que se encuentra en su trayectoria. El adelantamiento más sencillo ocurre en carreteras de un solo sentido, y consiste esencialmente en dos cambios de carril del vehículo que adelanta ($VH1$, figura 5.4), empieza con un cambio al carril izquierdo y termina con una vuelta al carril derecho, una vez se haya rebasado el vehículo adelantado ($VH2$), tal como se ha presentado en (Naranjo et al., 2008)².

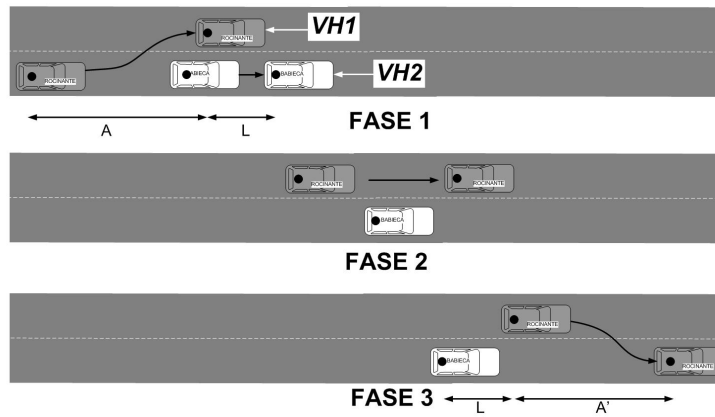


Figura 5.4: Fases del Adelantamiento

Para comenzar un adelantamiento se deben cumplir ciertas condiciones, entre ellas:

- Ambos vehículos $VH1$ y $VH2$ deben circular por el mismo carril y en un segmento recto de longitud suficiente para completar la maniobra.
- La velocidad del vehículo $VH1$ debe ser mayor que la del vehículo $VH2$.
- El carril izquierdo debe estar libre, o si se aproxima algún vehículo debe haber tiempo suficiente para completar el adelantamiento.

La figura 5.4 muestra las tres fases del adelantamiento, las distancias que recorre el vehículo $VH1$ en las fase 1 y 3 son A y A' respectivamente. Para el adelantamiento sin tráfico de frente solo es necesario considerar la distancia A , pues al no existir tráfico en el sentido contrario, no tiene sentido introducir la distancia A' , tal como se explica en (Naranjo et al., 2008). Sin embargo, como la dinámica del vehículo es diferente en cada fase, en este trabajo introducimos distancia A' y explicamos su utilidad en caso de que sea necesario abortar el adelantamiento.

²El algoritmo es válido para los países donde se conduce por la derecha.

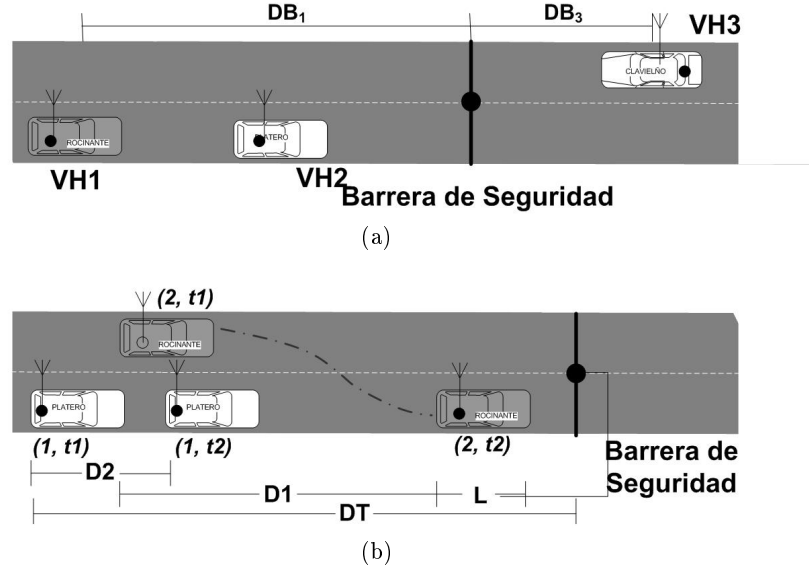


Figura 5.5: Posición inicial y final de vehículos en fase 3 del adelantamiento

5.2.3.1. Maniobra de adelantamiento con tres vehículos

La maniobra de adelantamiento descrita en el punto anterior solo ocurre en condiciones ideales, es decir, sin otros vehículos involucrados. En una situación normal, el conductor (en este caso el controlador del vehículo) no puede conocer a priori el comportamiento de los vehículos vecinos. Así, una vez iniciado el adelantamiento, el vehículo **VH2** puede acelerar repentinamente o aparecer otro vehículo en sentido opuesto (**VH3**).

El algoritmo de decisión, basado en lógica borrosa, que se presenta en este capítulo, resuelve las situaciones críticas en las que un conductor humano duda entre acelerar y terminar la maniobra, o frenar y volver a su posición inicial. Para ello es necesario conocer en todo momento la posición y la velocidad de todos los vehículos involucrados.

Un adelantamiento seguro exige tomar decisiones que garanticen que el vehículo **VH1** tenga tiempo suficiente para volver al carril derecho en cualquier momento y fase de la maniobra, sobre todo en el caso que se detecte un vehículo que se acerca en sentido opuesto. Para ello definimos una referencia dinámica que llamamos barrera de seguridad (**BS**), una línea ficticia perpendicular a la directriz de la carretera y situada delante del vehículo **VH2** a una distancia que varía con la velocidad relativa de **VH1** respecto a **VH2** (figura 5.5). La idea es estimar si el vehículo **VH1** llegará a la barrera de seguridad antes que el vehículo **VH3** y por tanto si tiene tiempo para volver al carril derecho, es decir, si hay espacio libre suficiente para completar el adelantamiento.

Supongamos que la fase 3 del adelantamiento se inicia en el instante t_1 -cuando el vehículo **VH1** está centrado en el carril izquierdo y ha rebasado al vehículo **VH2**- y acaba en el instante t_2 - cuando el vehículo **VH1** está centrado en el carril derecho-. En el intervalo $T = t_2 - t_1$, el vehículo **VH1** recorrería una distancia D_1 , considerando que el vehículo **VH2** está detenido. La posición de la barrera de seguridad estará también condicionada por la distancia D_2 que recorre el vehículo **VH2** en el mismo intervalo de tiempo. Por tanto la posición de la barrera de seguridad viene dada por la siguiente ecuación, donde L es la longitud del vehículo **VH1**, y DT es la distancia total.

$$DT = D_1 + D_2 + L \quad (5.1)$$

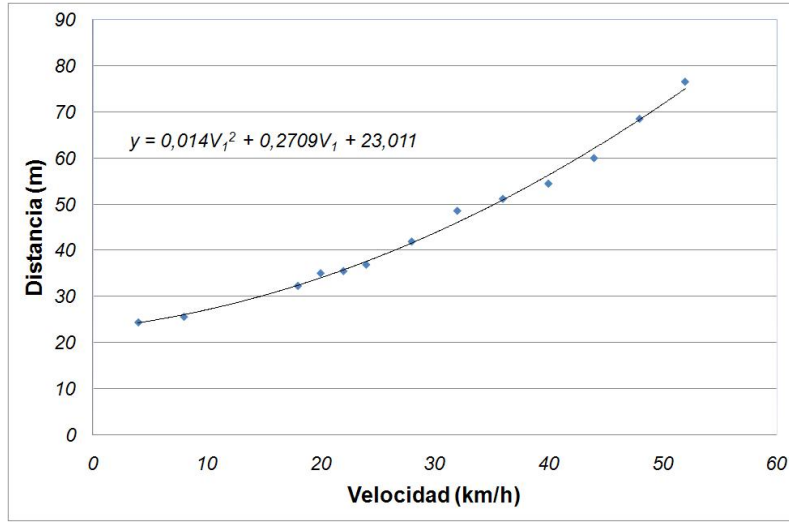


Figura 5.6: Ajuste de mínimos cuadrados para la distancia en el cambio de carril en función de la velocidad de $VH1$

Para estimar con precisión el valor de $D1$, se realizaron varios experimentos de vuelta al carril derecho -fase 3- a velocidades comprendidas entre 4 km/h y 52 km/h, con el vehículo $VH2$ detenido. En la figura 5.6 se representan los valores obtenidos. Mediante un ajuste con mínimos cuadrados se llega a la ecuación 5.2.

$$D1 = 0,014 * V_{VH1}^2 + 0,271 * V_{VH1} + 23,01 \quad (5.2)$$

Además, suponiendo que la velocidad media de $VH2$ en la fase 3 es V_{VH2} , tenemos que:

$$D2 = V_{VH2} * T \quad (5.3)$$

y

$$T = D1/V_{VH1} \quad (5.4)$$

luego la ecuación 5.1 la podemos reemplazar por:

$$DT = D1 * (1 + (V_{VH2}/V_{VH1})) + L \quad (5.5)$$

Si un tercer vehículo circula en sentido contrario, consideremos la velocidad relativa de $VH1$ respecto de $VH2$ y $VH3$:

$$V_{rel1} = V_{VH1} - V_{VH2} \quad (5.6)$$

y

$$V_{rel2} = V_{VH1} + V_{VH3} \quad (5.7)$$

Estos valores son positivos durante el adelantamiento, excepto cuando se den las condiciones para abortarlo, en este caso V_{rel1} puede ser negativo.

Con las posiciones de los vehículos y sus velocidades relativas se puede determinar una acción más segura, esto es: acabar el adelantamiento o abortarlo volviendo a la situación inicial. En consecuencia, sea DB_1 y DB_3 la distancia entre los vehículos $VH1$ y $VH3$ a la barrera de seguridad (BS), respectivamente (figura 5.5); y sea T_S - tiempo de seguridad

- y T_R - tiempo de recorte - el tiempo que tarda $VH1$ y $VH3$, en llegar a la barrera de seguridad, respectivamente, podemos definirlos como:

$$T_S = \frac{(DB_1)}{V_{rel1}} \quad (5.8)$$

y

$$T_R = \frac{(DB_3)}{V_{rel2}} \quad (5.9)$$

Para comprender mejor el sistema de decisión y control borroso para el adelantamiento con tres vehículos, conviene partir en dos la fase 2 de la maniobra, esto es, la fase en la que el vehículo que adelanta ($VH1$) circula por el carril izquierdo o, en otras palabras, el intervalo de tiempo desde que $VH1$ está alineado con la directriz del carril izquierdo y hasta que $VH1$ rebasa al vehículo $VH2$. Las tres fases de la figura 5.4 son suficientes para un adelantamiento entre dos vehículos, pero si un tercer vehículo circula en sentido contrario deben considerarse las fases 2.1 y 2.2 separadas por el instante en el que la parte trasera de ambos vehículos $VH1$ y $VH2$ están sobre la misma perpendicular a la directriz de la carretera. Como se explicará más adelante, en el punto 5.2.4.3, esta separación ayuda a entender el comportamiento del controlador borroso para abortar el adelantamiento, el cual se explica en la siguiente sección.

5.2.4. Controlador borroso para el adelantamiento

Con la experiencia previa de los conductores humanos se pueden definir los parámetros de control, las funciones de pertenencia y las reglas del control borroso para la maniobra de adelantamiento, tal como se ha explicado en la sección 2.4.2 de esta tesis. Desde que (Sugeno y Nishida, 1985) utilizaran controladores borrosos para emular la conducción humana, conocemos que para una conducción autónoma no se requiere conocer la dinámica completa de los vehículos, ya que basta con emular las acciones de los conductores.

El controlador de un vehículo autónomo que realiza adelantamientos combina el control lateral y longitudinal. Este último alterna entre el control de cruce - CC - y el control de cruce adaptativo - ACC - durante la ejecución de la maniobra. Si durante la marcha se alcanza a otro vehículo más lento y se dan las condiciones descritas en la sección 5.2.3, se inicia la maniobra de adelantamiento. Por último, si durante el adelantamiento las condiciones que lo posibilitaron fallan, se activa la maniobra de interrupción del adelantamiento.

Es importante aclarar que en las furgonetas el control longitudinal tiene la misma estructura que se presenta en el capítulo 4, sección 4.5, donde la salida que da el controlador borroso va directamente a un contador incremental, el cual da prioridad de acción al acelerador, como un conductor humano haría (figura 4.2).

5.2.4.1. Controlador para el cambio de carril

Durante el cambio de carril, el control longitudinal se basa en un control de cruce que mantiene la velocidad convenida. El control de la dirección utilizado en este vehículo ha sido diseñado antes en (Naranjo, 2005). En (Pérez et al., 2009) se detallan las limitaciones que tiene la etapa de potencia de la dirección de *Rocinante*, las cuales no permiten implementar el esquema de control presentado en el capítulo 3 de esta tesis. Este solo ha sido implementado en maniobras individuales en *Babieca*.

En (Naranjo et al., 2008) se muestran las funciones de pertenencia de las variables del control lateral. Las reglas de control son las siguientes:

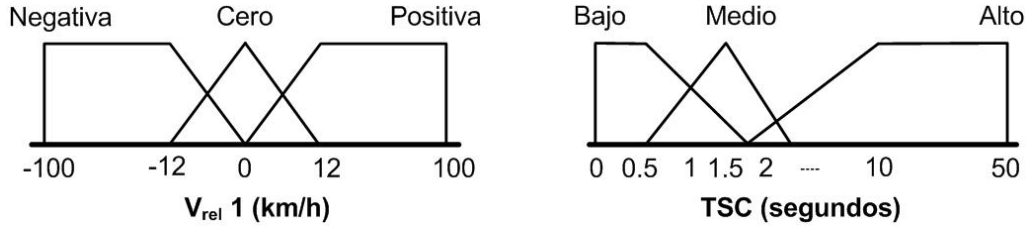


Figura 5.7: Funciones de pertenencia de entrada del Controlador CBAA

SI Error Lateral *Izquierda* **ENTONCES** Posición Volante *Derecha*.

SI Error Lateral *Derecha* **ENTONCES** Posición Volante *Izquierda*.

SI Error Angular *Izquierda* **ENTONCES** Posición Volante *Derecha*.

SI Error Angular *Derecha* **ENTONCES** Posición Volante *Izquierda*.

5.2.4.2. Controlador borroso para abortar el adelantamiento (CBAA)

Hasta ahora, las tareas de control para vehículos autónomos presentados en (Naranjo, 2005; Onieva, 2011) definían la conducción en tramos rectos y curvos, en función de la posición del recorrido y la distancia hasta el destino final. Este planteamiento solo es válido para maniobras individuales, no en situaciones de tráfico real. En este sentido, se ha diseñado un controlador de tráfico real, capaz detectar la llegada de un vehículo en sentido contrario (*VH3*) -en función de la información recibida por el sistema de comunicaciones-, cuando se realiza un adelantamiento en carreteras de doble sentido.

El controlador borroso para abortar la maniobra de adelantamiento (CBAA) utiliza dos nuevas variables de entrada: la velocidad relativa - V_{rel1} - del vehículo *VH1* respecto del vehículo *VH2* (ecuación 5.6), y el tiempo de separación ante colisión - TSC - (ecuación 5.10) que queda para que impacten los vehículos que circulan en sentidos opuestos *VH1* y *VH3*, donde D_{13} es la distancia en metros entre ambos vehículos.

$$TSC = \frac{(D_{13})}{(V_{VH1} + V_{VH3})/3,6} \quad (5.10)$$

En la figura 5.7 se muestran las funciones de pertenencia de los valores lingüísticos que toman las variables V_{rel1} y TSC . Se definen tres valores lingüísticos para cada una de las entradas del controlador CBAA. A continuación detallamos estos valores y su significado.

- Valores lingüísticos de la variable V_{rel1} : *Negativa* refleja la situación en la que, durante el adelantamiento, el vehículo *VH2* acelera hasta superar la velocidad del vehículo *VH1*. Éste debe retornar al carril derecho y abortar la maniobra. *Cero* refleja la situación en la que ambos vehículos llevan velocidades similares. En función del valor de TSC el vehículo *VH1* bien acelera para finalizar la maniobra o decelera para volver a situarse tras el vehículo *VH2*. *Positiva* refleja la situación más habitual en la maniobra de adelantamiento, en la que la velocidad del vehículo *VH2* es inferior a la del vehículo *VH1*.

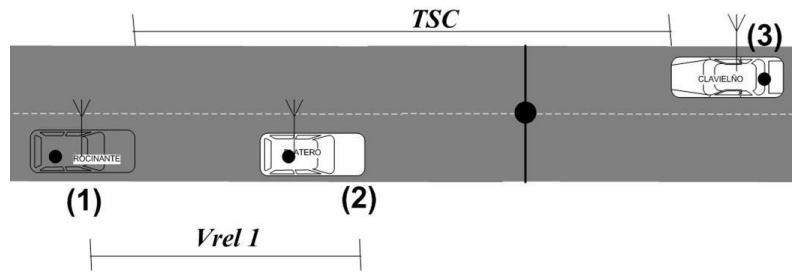


Figura 5.8: Variables de entrada del controlador CBAA

Acelerador			
TSC/V_{rel1}	Bajo	Medio	Alto
Negativa	levanta	levanta	pisa
Cero	levanta	mantiene	mantiene
Positiva	levanta	levanta	levanta
Freno			
TSC/V_{rel1}	Bajo	Medio	Alto
Negativa	mantiene	mantiene	levanta
Cero	pisa	levanta	levanta
Positiva	pisa	levanta	levanta

Tabla 5.1: Reglas borrosas para la acción del acelerador y el freno

- Valores lingüísticos de la variable TSC : *Alto* corresponde a las situaciones en las que no hay tráfico de frente o, si lo hay, el vehículo que circula por el carril contrario está lo suficientemente alejado para no influir en la maniobra. *Bajo* trata de agrupar las situaciones en las que un vehículo circula por el carril contrario y se encuentra tan cerca que pone en peligro la maniobra de adelantamiento. *Medio* refleja las situaciones dudosas en las que el valor real de la variable V_{rel1} determinará la acción a tomar. La figura 5.8 muestra la posición inicial de los vehículos para la maniobra de adelantamiento, y los vehículos asociados a cada variable de entrada.

Finalmente conviene mencionar que para establecer los parámetros de las funciones de pertenencia de los valores lingüísticos se reprodujeron posibles situaciones que pueden ocurrir durante un adelantamiento en una vía de doble sentido con tres vehículos conducidos manualmente. Así, se realizaron pruebas en las que se frenaba el vehículo que adelanta para abortar la maniobra o se aceleraba para finalizar de forma segura. Posteriormente, un análisis de los valores obtenidos del TSC y V_{rel1} ha permitido determinar los límites de las funciones de pertenencia. Nótese que un ajuste más fino de los parámetros de las funciones de pertenencia así obtenidos, ya sea mediante algoritmos genéticos o sistemas neuro-borrosos, es innecesario para el alcance de este trabajo. El motivo es que en el comportamiento de vehículos en maniobras cooperativas, guiados por conductores humanos, no es predecible y cambia totalmente de un experimento a otro. En cualquier caso, los resultados experimentales demuestran que la elección de las reglas así como de las funciones de pertenencia es acertada. Las etiquetas singleton (-1, 0 y 1) de las salidas del controlador son levanta, mantiene y pisa, para ambos pedales del vehículo.

Las reglas de control se describen a continuación en la tabla 5.1. La salida del con-

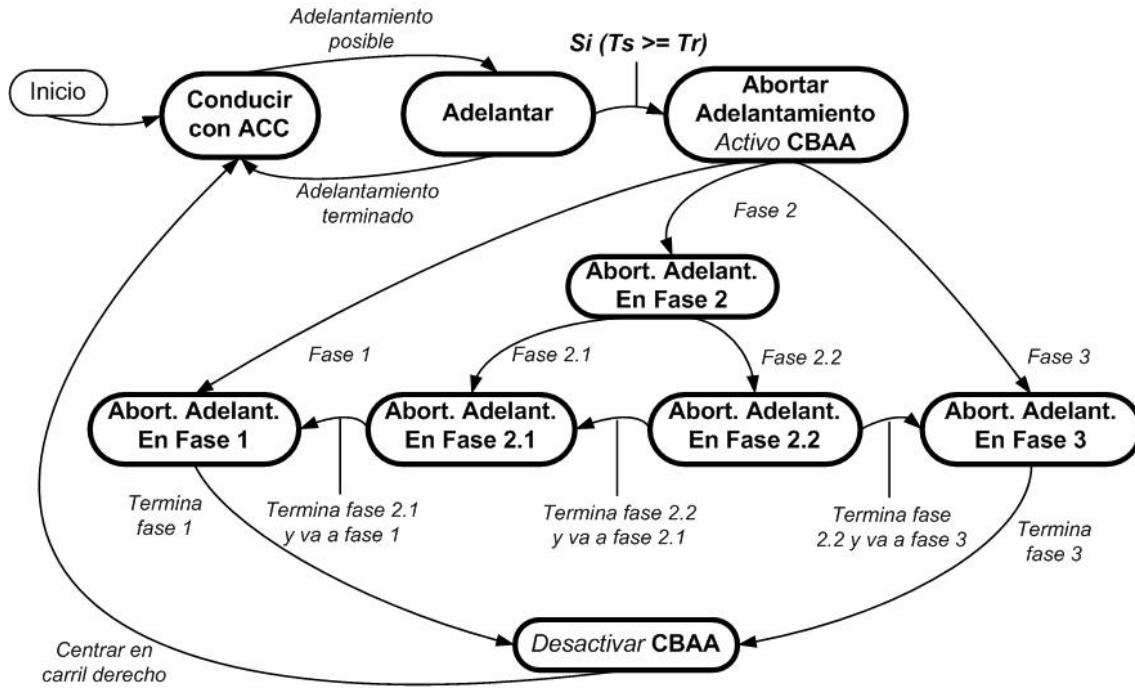


Figura 5.9: Diagrama de estados con todos los modos de conducción. Esquema para la maniobra de abortar adelantamiento

trolador va una etapa incremental y da prioridad al acelerador sobre el freno, como se ha descrito en la sección 4.5.

5.2.4.3. Diagrama de estados para la maniobra de adelantamiento

La figura 5.9 muestra el diagrama de estados implementado para controlar nuestro vehículo autónomo. El primer estado es el de conducción con ACC (Milanés et al., 2009a). En este modo de conducción el vehículo circula en el carril derecho. Si se cumplen las condiciones para adelantar, el vehículo comienza la maniobra (sección 5.2.3).

Los tiempos T_S y T_R , determinan si el vehículo puede completar la maniobra adelantamiento normalmente. Si se aproxima algún vehículo en sentido contrario o el vehículo adelantado aumenta su velocidad repentinamente, $VH1$ entra en el estado de abortar el adelantamiento y se activa el controlador CBAA. Éste controlador solo actúa sobre el control longitudinal, ya que el control lateral es el mismo desarrollado previamente en el grupo para el cambio de carril (Naranjo et al., 2008). En función de la fase en la que se encuentre el vehículo al activar este modo, se procederá a mantener el carril izquierdo (fase 2) o a cambiar nuevamente al carril derecho (fase 1 y 3).

El controlador CBAA actúa en función de las condiciones del entorno, para que $VH1$ pueda volver de forma segura al carril derecho y evitar la colisión con el vehículo que viene en sentido contrario. Esto se ve reflejado en la figura 5.9. Si el vehículo se encuentra en fase 2 o fase 3, el controlador CBAA puede evaluar las condiciones para aumentar la velocidad o reducirla. Si el tiempo TSC es alto y la velocidad V_{rel1} positiva, el vehículo puede acelerar hasta acabar el adelantamiento. La fase 2 se divide en dos (respetando la terminología utilizada en trabajos previos (Naranjo et al., 2008), ya que las acciones del CBAA son distintas en cada una. En fase 2.1 el CBAA puede reducir la velocidad y el

vehículo mantendría el carril izquierdo hasta que el vehículo *VH2* pase delante y *VH1* pueda volver al carril derecho. Si el vehículo *VH1* está en la fase 2.2, el CBAA puede pasar a fase 3, volver al carril derecho y terminar la maniobra exitosamente. El controlador CBAA se desactiva una vez que el vehículo vuelve al carril derecho.

5.2.5. Experimentos

El esquema de control descrito ha sido probado en numerosos experimentos en diversas situaciones. A continuación, se muestran los resultados de tres casos particulares en los experimentos con vehículos reales:

1. Adelantamiento sin tráfico en sentido opuesto.
2. Interrupción del adelantamiento disminuyendo la velocidad del vehículo (*VH1*).
3. Finalización del adelantamiento aumentando la velocidad del vehículo (*VH1*).

5.2.5.1. Adelantamiento sin tráfico en sentido opuesto

La figura 5.10 muestra la evolución de las velocidades del vehículo guía (*VH2*) y el vehículo automático (*VH1*) durante una maniobra de adelantamiento sin tráfico frontal así como las transiciones entre las distintas fases del adelantamiento. Durante los primeros 35 segundos, el vehículo autónomo sigue al vehículo guía en modo ACC.

Cuando se verifican las condiciones para adelantar (aumenta su velocidad hasta llegar a los 16 km/h), el controlador entra en funcionamiento activando la fase 1. En ese instante la velocidad del vehículo automático se incrementa considerablemente para rebasar al vehículo guía. El tiempo empleado en la maniobra se refleja en la suma de las tres fases en las que se divide la maniobra de adelantamiento.

5.2.5.2. Abortar el adelantamiento en fase 1 (disminuyendo la velocidad)

Los siguientes experimentos usan tres vehículos posicionados estratégicamente para provocar, las diferentes fases de la maniobra, y así poder decidir si seguir o abortar el adelantamiento. En la figura 5.8 se mostró la posición inicial de los vehículos para los siguientes casos de uso: abortar en fase 1 y abortar en fase 2.2. La idea es probar el comportamiento del controlador CBAA, tanto para reducir la velocidad y volver al carril

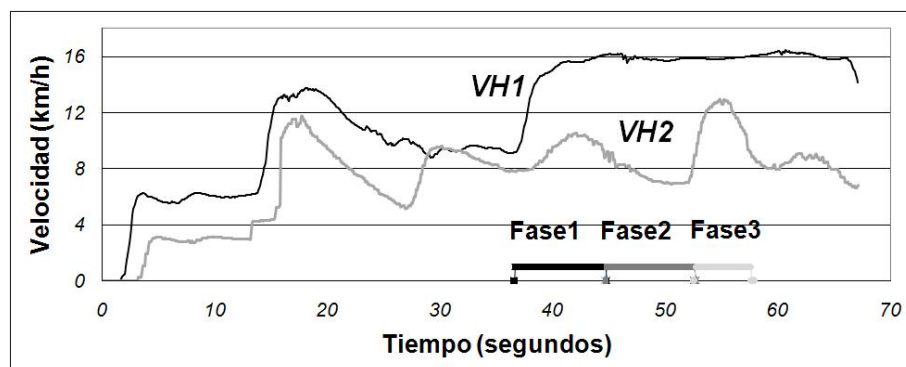


Figura 5.10: Velocidades y fases del adelantamiento entre dos vehículos

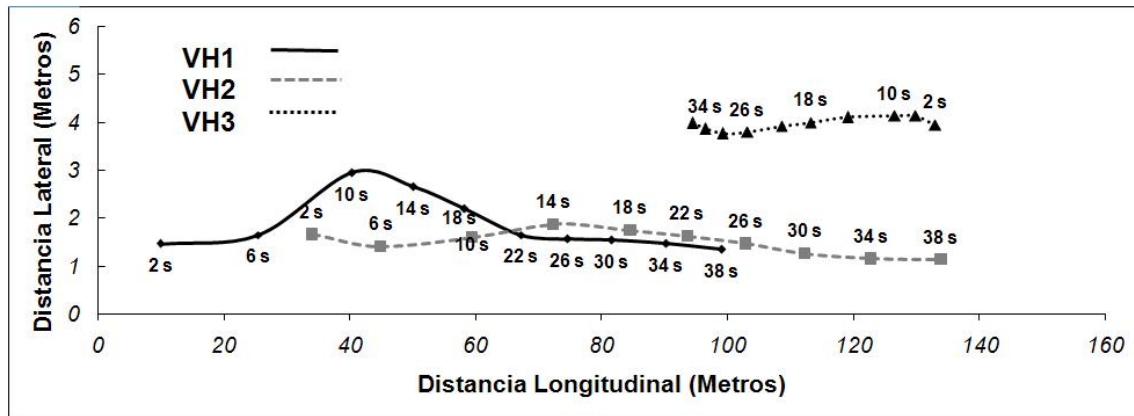


Figura 5.11: Abortando adelantamiento en fase 1

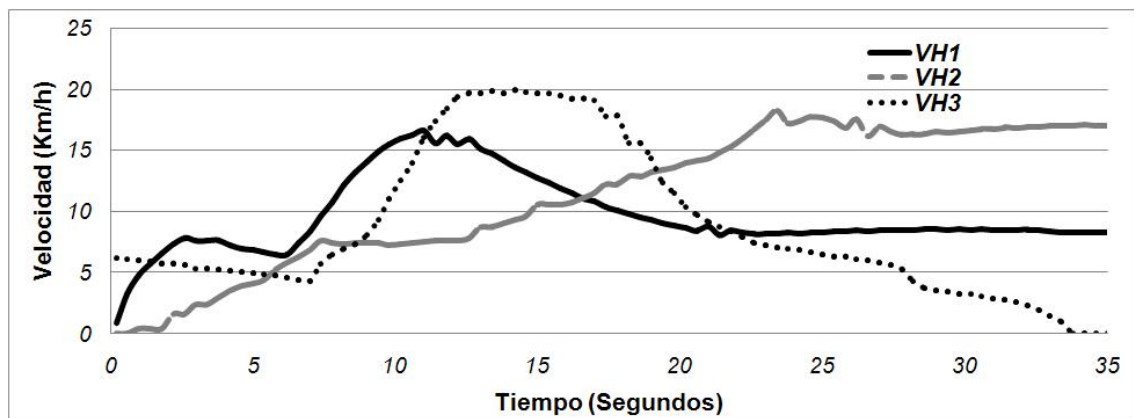
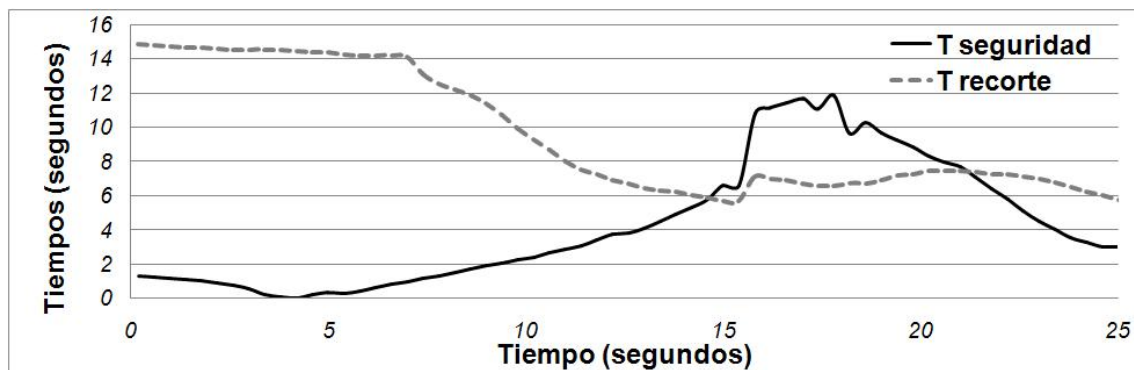


Figura 5.12: Velocidades de los tres vehículos en la fase 1

Figura 5.13: Tiempos seguridad (T_S) y recorte (T_R) en la fase 1

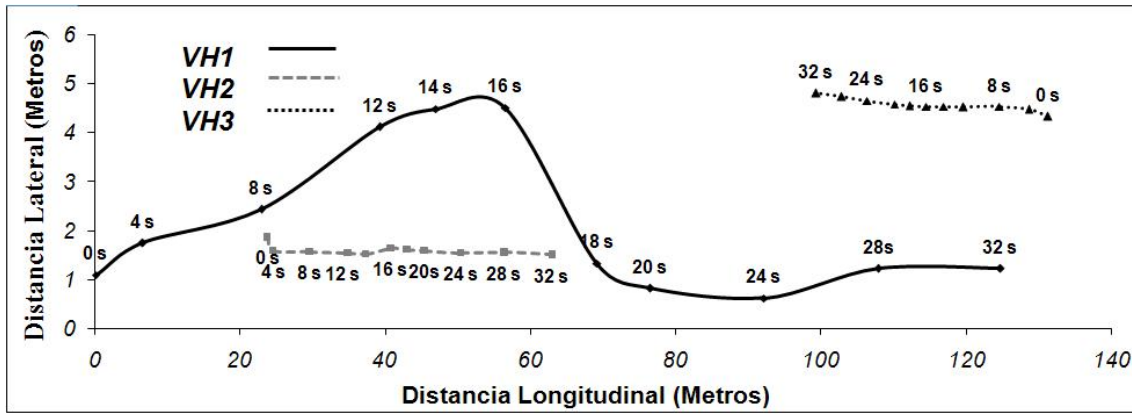


Figura 5.14: Abortando adelantamiento en fase 2.2

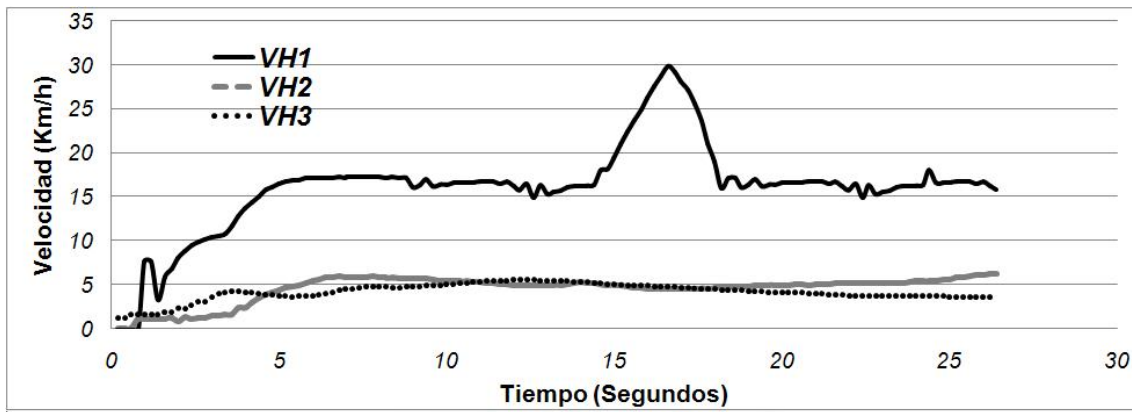


Figura 5.15: Velocidades de los tres vehículos en la fase 2.2

derecho, como para terminar de superar al vehículo *VH2*, aumentando la velocidad hasta terminar la maniobra de adelantamiento, si el entorno lo permite.

En las figuras 5.11 y 5.12 se muestra la posición de los vehículos, cada 4 segundos, y sus velocidades en función del tiempo durante el experimento. Alrededor del segundo 6 (figura 5.12), se aprecia un incremento en la velocidad del vehículo autónomo con la intención de rebasar al vehículo guía. El aumento de la velocidad del vehículo que circula en sentido contrario en el segundo 10, además de un aumento progresivo en la velocidad del vehículo *VH2*, provoca un cambio en los parámetros que determinan la viabilidad del adelantamiento y, en consecuencia, una inmediata disminución de la velocidad del vehículo automático, ya situado en el carril izquierdo, alrededor del segundo 14, volviendo de forma segura detrás del vehículo guía y abortando el adelantamiento.

La evolución de los tiempos T_S y T_R del controlador se muestra en la figura 5.13. Se observa que al principio de la maniobra el tiempo de recorte es mayor que el de seguridad, pero a medida que el vehículo *VH3* se aproxima, el tiempo de seguridad aumenta hasta que supera al de recorte, momento en el que, alrededor del segundo 14, se activa el controlador para abortar el adelantamiento. Dado que el vehículo autónomo reduce su velocidad, el tiempo deja de crecer. Aunque, después de la primera activación, no se vuelve a considerar el valor de estos tiempos. Cuando el vehículo haya regresado al carril derecho es cuando se reconsidera nuevamente la maniobra de adelantamiento.

5.2.5.3. Abortar el adelantamiento en fase 2.2 (aumentando la velocidad)

En este último experimento, se muestra como el sistema de control diseñado no sólo es capaz de frenar al vehículo en caso de riesgo, sino de acelerar y terminar la maniobra si ésta es la acción más segura. Al igual que en el experimento anterior, las posiciones y velocidades de cada uno de los vehículos se muestran en las figuras 5.14 y 5.15 respectivamente. Siguiendo la figura 5.15, se aprecia un incremento inicial (segundo 4) de la velocidad para realizar el adelantamiento de forma segura. La detección de un vehículo en sentido contrario, provoca la entrada del controlador CBAA que, alrededor del segundo 15, decide incrementar significativamente la velocidad para terminar el adelantamiento de forma segura.

5.3. Control de crucero utilizando RFIDs

Recientemente, las investigaciones en ITS han tenido una influencia directa en la mejora de sistemas de seguridad y control en vehículos comerciales. Un ejemplo de esto es el *CC*, el cual permite mantener la referencia de velocidad, con el objetivo de economizar en combustible y evitar accidentes y multas a alta velocidad, haciendo que el conductor este enfocado sólo en la acción sobre el volante. Sin embargo, mantener un *CC* eficiente a bajas velocidades no es tarea fácil, (tal como se ha explicado en el capítulo 4) sobre todo porque muchas veces los carteles del límite de velocidad aparecen repentinamente, o no se encuentran visibles para los conductores.

Si bien el problema del control de crucero ha sido muy estudiado, no así cuándo modificar de forma inteligente y segura dichas velocidades. Una de las grandes tendencias en la actualidad es utilizar comunicaciones inalámbricas, bien Vehículo-Vehículo -V2V-, bien Infraestructura-Vehículo -I2V- para incrementar la seguridad en el tráfico.

En este contexto, en esta sección se presenta un nuevo sistema inteligente de control de la velocidad basado en comunicaciones I2V, utilizando tarjetas de identificación por radio frecuencia -RFID- (*Radio Frequency IDentification*) que permite dotar de inteligencia a las señales convencionales de tráfico. Conjuntamente se utiliza una señal de alta precisión, basada en un sensor de efecto Hall acoplado a un disco dentado en las ruedas delanteras del vehículo (capítulo 3, sección 3.4.2) para mejorar la precisión de la medida de velocidad en el vehículo. El controlador borroso longitudinal, análogo al presentado el capítulo 4 de esta tesis, ha sido desarrollado previamente (Naranjo, 2005), en una de las furgonetas eléctricas del programa AUTOPÍA. Las pruebas han sido realizadas con señales de tráfico reales en las instalaciones del CAR.

5.3.1. Trabajos previos

Los sistemas ADAS están ayudando a reducir significativamente el número de accidentes en la carreteras. Estos sistemas utilizan tecnologías acústicas, hápticas e incluso señales virtuales sobre mapas o cartografía digital para advertir al conductor de los riesgos de colisión que existen a su alrededor. Hoy en día, estos sistemas están revolucionando las líneas de producción de los fabricantes de automóviles, y las perspectivas a futuro indican que una mayor seguridad solo se alcanzará con la automatización de los vehículos y el creciente número de sensores que se pueden instalar en la infraestructura y en los vehículos mismos (European-Comission, 2010; Koenders, 2011).

Como se ha mencionado anteriormente, un buen ejemplo de los sistemas ADAS es el control crucero -CC-, el cual tiene la capacidad de mantener una velocidad de referencia

preestablecida (Ioannou y Chien, 1993). También su evolución, el ACC, ayuda a mantener una distancia de seguridad con el vehículo que le precede (Milanés et al., 2009a). Uno los inconvenientes que tienen estos sistemas es que no son capaces de distinguir entre tramos rectos o curvos, donde los límites de velocidad se reducen para evitar accidentes. No obstante, sistemas de aviso en curvas -CWS- (textitCurve Warning Systems) han sido recientemente desarrollados, combinando las ventajas de los sistemas de posicionamiento global y mapas digitales obtenidos de los sistemas de información geográfica -GIS- (*Geographical Information System*), para evaluar los niveles de riesgo que tiene un conductor a la hora de aproximarse a una curva a mucha velocidad (Lusetti et al., 2008). Del mismo modo, sistemas inteligentes de velocidad asistida -ISA- (*Intelligent Speed Assistance*) advierten al conductor sobre los límites de velocidad según la zona en donde esté circulando (Van Nes et al., 2008).

La mayor desventaja que presentan los sistemas mencionados, es que no funcionan en caso de circunstancias inesperadas en la carretera como obras, desvíos de tráfico o accidentes, entre otros, ya que sería necesario actualizar en tiempo real las bases de datos de los mapas.

La idea principal de esta sección es proponer un sistema, basado en sensores RFIDs, para seleccionar el tipo de señal ubicada dentro del alcance del vehículo, y que adviertan del límite de velocidad utilizado en ese tramo de la carretera. Además, mientras que los sistemas de reconocimiento de señales de tráfico basados en visión pueden presentar fallos en función de la visibilidad (insuficiente luz, condiciones climatológicas adversas o pérdida de la línea de vista ocasionada por otros vehículos) (OMalley et al., 2011), la señales RF pueden transmitir de forma fiable.

En los últimos años, la tecnología RFID ha ido gradualmente incorporándose en los sistemas de transporte comerciales. Un ejemplo conocido de estas aplicaciones es el sistema de cobro de peaje en autovías basado en RFIDs que se utiliza en muchos países. Algunos de los más conocidos son: el sistema *Telepass* en Italia (Meinel, 1992), o el *Autopass* en Noruega (Skadsheim, 2003).

Otros usos de los RFID incluyen sistemas de vigilancia para evitar robos de vehículos (Fan y Zhang, 2009), control de acceso a vehículos en aparcamientos o zona privadas (Hsieh et al., 2008), y la inclusión de etiquetas RFID en las matrículas de los vehículos para detección codificada de los mismos (Zhou et al., 2008).

Por otra parte, la colocación de etiquetas RFID en el borde de la carretera se ha propuesto con el fin de mejorar la localización de vehículos dentro de túneles o zonas urbanas, ya que en muchos de estos casos la calidad de la señal GPS es poco fiable (Chon et al., 2004). Los trabajos realizados en (Seo et al., 2008), proponen un sistema para ciudades futuristas para la recolección de información utilizando etiquetas RFID. El sistema utiliza la información sobre el tráfico recogido por una red de lectores de radio frecuencia para regular el tráfico en intersecciones o puntos críticos de las ciudades. En (Sato y Makane, 2006) se describe un ADAS, que utilizada etiquetas RFID pasivas, dispuestas en la carretera, cerca de la posición de las señales de tráfico. La antena receptora se encuentra ubicada en la parte trasera del vehículo, permitiendo la lectura de la información almacenada en cada etiqueta, y transmitiendo un mensaje visual o auditivo al conductor.

El trabajo que se explica en la presente sección ha sido realizado en colaboración entre el programa AUTOPÍA y el grupo LOPSI (*Grupo de localización y exploración en sistemas inteligentes*), ambos pertenecientes al CAR, dentro del marco del proyecto Envite³. El objetivo de este trabajo es construir una red de sensores para la comunicación I2V,

³Ministerio de Fomento, T7 / 06.

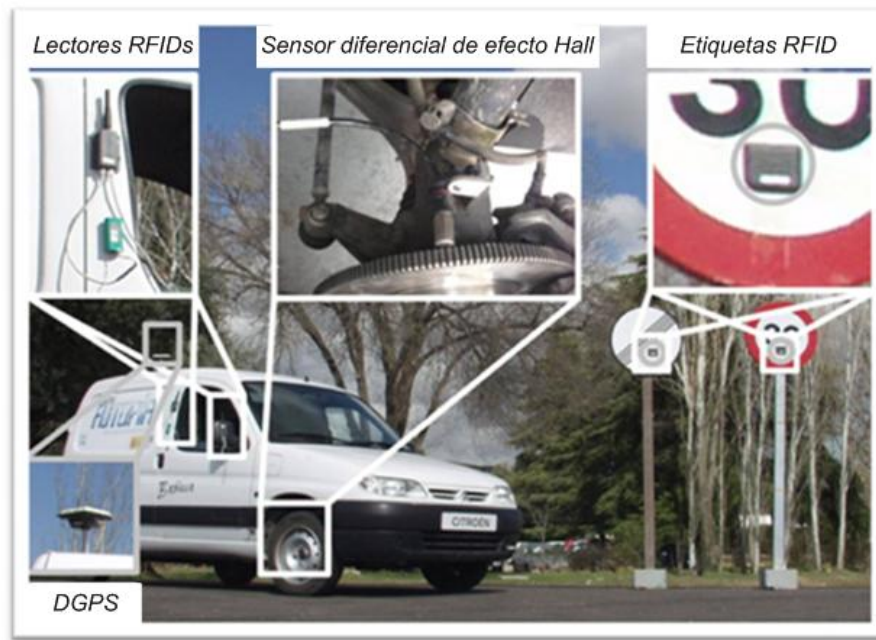


Figura 5.16: Sensores instalados en el vehículo y la infraestructura para los experimentos con RFIDs

basados en tecnología con RFIDs, que permiten transmitir la información proveniente de señales activas, y así adaptar la velocidad cruce de un vehículo autónomo, y con ello evitar accidentes. Por señal activa se entiende señales de tráfico que incorporan etiquetas RFID activas con información previamente almacenada. Esta información es recolectada en tiempo real por un par de receptores RFID ubicado en el vehículo, que se ha modificado para cambiar automáticamente su velocidad de referencia en función de las circunstancias de la ruta. Esto es, controlar los actuadores (acelerador y freno) para mantener la velocidad de referencia dada por la red de sensores.

A continuación se describen y mencionan los sensores instalados en el vehículo (lector RFID, y sensores a bordo del vehículo) y en la infraestructura (las etiquetas RFID). Luego se explicará la arquitectura utilizada para procesar la información proveniente de los sensores. Finalmente se comentarán los experimentos llevados a cabo para la validación de ésta propuesta.

5.3.2. Plataforma y escenario de pruebas

Para el desarrollo experimental de las pruebas se ha instalado, tanto en el vehículo como en la infraestructura, un conjunto de sensores. En cuanto al controlador de cruce empleado, se ha usado el diseñado en el capítulo 4 de la presente tesis, pero implantado en un vehículo eléctrico (Pérez et al., 2010b). El vehículo utilizado en estos experimentos es una de las furgonetas (*Babioca*) del programa AUTOPÍA (sección 2.4.1).

Los sensores se agrupan en tres sistema: detección de señales de tráfico basado en RFIDs, sensor de efecto Hall de alta precisión acoplado a la rueda delantera del vehículo (explicado en la sección 3.4), y un GPS diferencial para conocer la posición del vehículo y así calcular la distancia a las señales.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, el GPS también es utilizado para

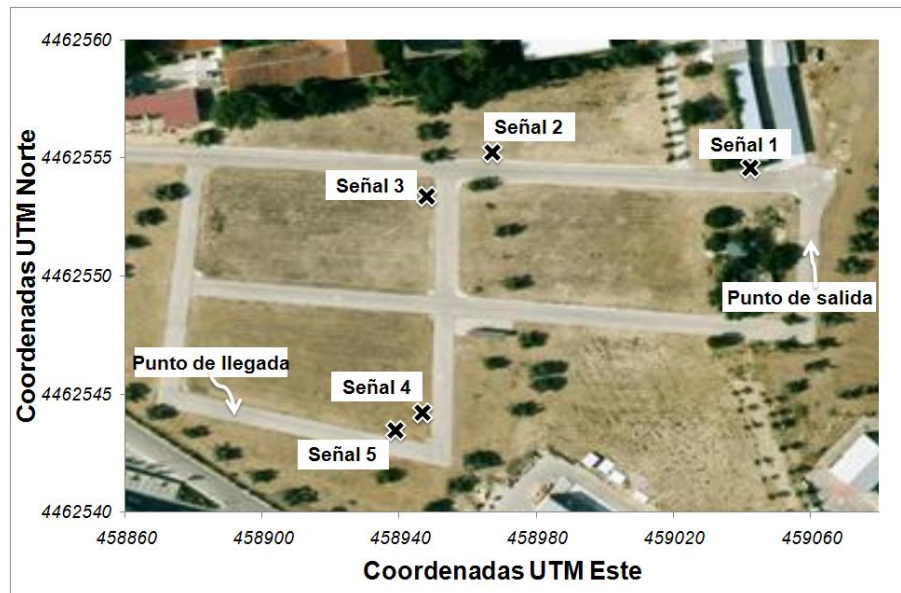


Figura 5.17: Posiciones de señales de tráfico para el control de cruceo inteligente con RFIDs en las instalaciones del CAR

cerrar el lazo de control de los vehículos. En los experimentos que se muestran a continuación solo se ha considerado el control longitudinal, ya que el volante será llevado por un conductor. La disposición física de estos dispositivos dentro del vehículo y en la infraestructura se muestra en la figura 5.16.

5.3.2.1. Entorno de pruebas

Los experimentos que se presentan a continuación han sido realizados en las pistas privadas del CAR. En la figura 5.17 se observa la posición de cada señal dentro del circuito, así la posición inicial y final del experimento. Cada señal se ha configurado para transmitir diferentes velocidades de referencia para el vehículo (se han utilizado cinco señales para las pruebas).

Los detalles de cada señal de tráfico, junto sus respectivas etiquetas RFID, se mencionan en la tabla 5.2. Las etiquetas RFID han sido adheridas en la parte delantera y trasera de cada señal, a una altura de 2.05 metros sobre el suelo, mientras que los lectores (colocados en el lado derecho del vehículo) han sido colocados a 1.4 y 1.6 metros respectivamente. A continuación se describen los sensores utilizados en la comunicación I2V en los experimentos.

5.3.2.2. Identificadores por radio frecuencia (RFID)

Un sistema basado en identificadores por radio frecuencia, conocidos por sus siglas RFID, consiste en un conjunto de emisores o etiquetas que, periódicamente o a través de peticiones, transmiten un mensaje digital a través de una señal de radiofrecuencia, que contiene un código de identificación (único para cada etiqueta), así como algunos datos almacenados en la memoria de las mismas.

Estos datos son obtenidos remotamente a través de un ordenador equipado con lectores RFID (PC secundario de la etapa de decisión, figura 5.21). Además de leer la identidad

Señal	ID de la etiqueta	Coordenadas UTM	Información
1	604123 ; 604124	459045.89 ; 4462554.75	Segmento recto, se establece la velocidad de referencia en 25 km/h
2	604140 ; 604148	458974.32 ; 4462558.7	Curva delante, se reduce la velocidad de referencia a 10 km/h
3	604142 ; 604141	458950.22 ; 4462543.39	Salida de la curva, se establece la velocidad de referencia en 20 km/h
4	604135 ; 604127	458948.64 ; 4462473.12	Curva pronunciada, se reduce la velocidad de referencia a 8 km/h
5	604126 ; 604133	458939.72 ; 4462465.47	Nuevo segmento recto, se establece la velocidad de referencia en 25 km/h

Tabla 5.2: Descripción de las señales de tráfico utilizadas en el entorno de pruebas

de cada etiqueta, lo que a su vez confirma la presencia de la etiqueta dentro del rango de detección del lector, éste puede medir el nivel RSSI (*Received Signal Strength Indication*) de cada señal. Este es uno de los parámetros más utilizados para medir el nivel de potencia que tienen las señales recibidas a través de una red inalámbrica.

La principal ventaja de los sistemas RFID - en comparación con otras tecnologías RF, que pueden utilizarse también para comunicaciones I2V - es su bajo coste y su mínimo mantenimiento, lo que permite una alta escalabilidad y una fácil implementación en la infraestructura, tal como se ha descrito en los trabajos previos. Las etiquetas RFID utilizadas en esta investigación son económicas (su valor oscila entre 10 y 20 euros), pueden conectarse fácilmente en las señales de tráfico y tienen una vida útil de 5 años ⁴. En la parte derecha de la figura 5.16 se muestran las etiquetas RFID colocadas sobre las señales de tráfico.

Para la aplicación descrita en este capítulo se ha seleccionado los sensores RFID proporcionados por Wavetrend Inc ⁵. Específicamente, se han utilizado las etiquetas activas modelo TG800, las cuales emiten regularmente a 1.5 segundos con una frecuencia de 433 MHz. Estas etiquetas han demostrado ser muy resistentes y están alimentadas con sus propias baterías. Además, dos módulos de lectura, modelo RX-201, se han utilizado en la parte derecha del vehículo controlado longitudinalmente, según se muestra en la figura 5.16, y son conectados a un ordenador a bordo a través de conexiones Ethernet. Los dos lectores han sido instalados para darle redundancia al sistema, y evitar las pérdidas de paquetes que podrían producirse con uno solo.

Es conveniente que las señales RF, emitidas por las etiquetas colocadas en las señales de tráfico, sean detectadas con suficiente distancia, para poder tomar las acciones de control sobre el vehículo con el máximo confort posible para los ocupantes del mismo. Físicamente, el rango de transmisión de un sistema RF se ve limitado por la interferencia de la onda transmitida directamente desde el emisor (o etiqueta) al receptor (o lector), y las ondas

⁴<http://www.wavetrend.net/downloads/information-sheets/TG800-0A-PI-A4.pdf>

⁵<http://www.wavetrend.net/index.php>

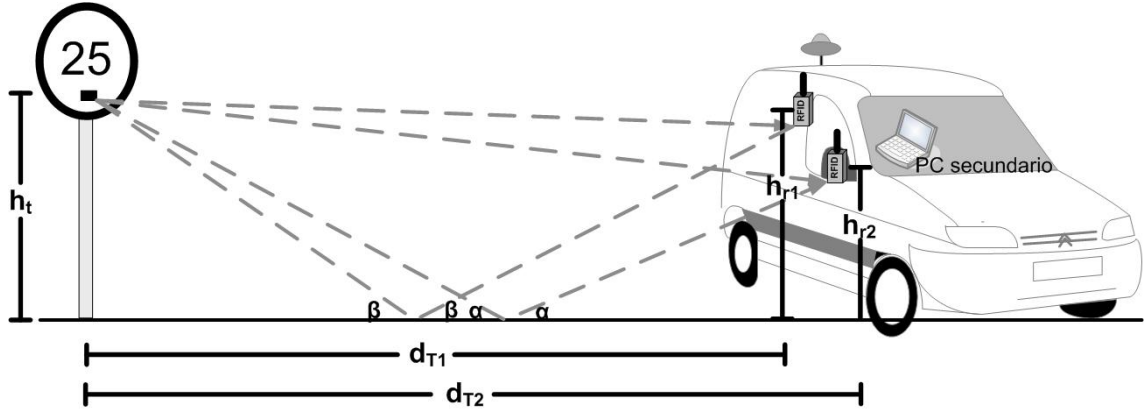


Figura 5.18: Disposición de las etiquetas y lectores RFID en las señales de tráfico y la furgoneta

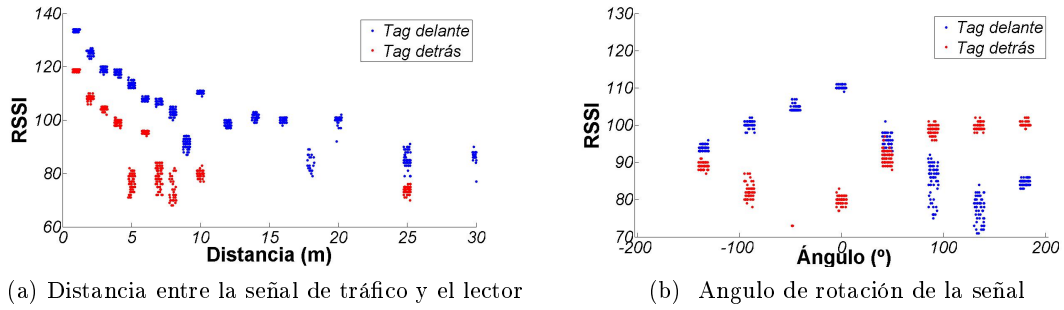


Figura 5.19: Intensidad de las señales colocadas en el frente y reverso de la señal de tráfico, el receptor se encuentra a 1,5 metros sobre el suelo y a 10 metros de distancia

de rebote o reflejadas en el plano del suelo (Rappaport, 2003). Para rangos mayores a la distancia crítica, las ondas se anulan entre sí, y la intensidad de la señal recibida disminuye considerablemente. En este sentido, una aproximación al rango útil de un sistema de transmisión RF viene dada por:

$$d_T = \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda} \quad (5.11)$$

Donde λ es la longitud de onda de la señal RF, y h_T y h_R son la altura respecto al suelo del transmisor y del receptor, respectivamente.

De la ecuación 5.11 se puede deducir claramente que lo más conveniente es colocar las etiquetas y los lectores lo más alto posible del suelo. En nuestro caso, las etiquetas se han colocado en la placa central de las señales de tráfico a 2,05 metros. Los lectores (ubicados en el lateral derecho del vehículo) se encuentran a 1,4 y 1,6 metros sobre el suelo, como se muestra en la figura 5.18. Para una longitud de onda de 0,69 metros, se tiene una distancia de propagación de aproximadamente 28 metros. Como se verá más adelante, experimentalmente se ha encontrado que las señales se detectan correctamente a 30 metros de distancia entre etiqueta y lector, y en ocasiones a distancias aún mayores.

Además de determinar si una señal de tráfico está dentro del rango de uno de los lectores situados en el vehículo autónomo, es también importante detectar la orientación, ya que si la señal se encuentra de espaldas al vehículo, éste no deberá considerar dicha información.

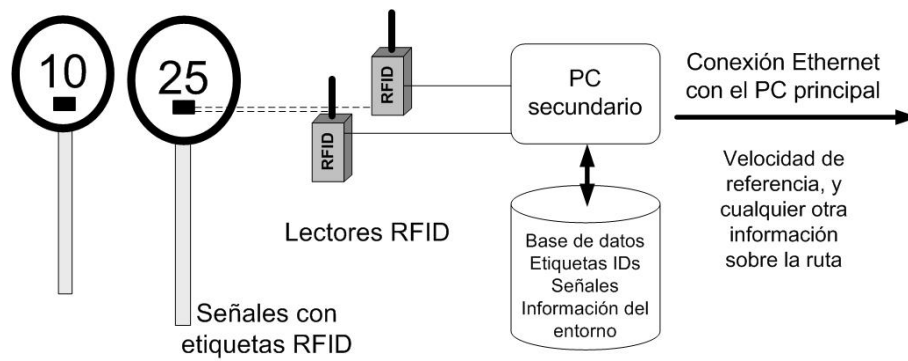


Figura 5.20: Diagrama operacional del subsistema de comunicaciones, basado en RFID

Para distinguir la orientación de la señal, se ha colocado una etiqueta en la parte frontal y otra en la parte trasera de la señal de tráfico. La figura 5.19 muestra la dependencia de la señal recibida con: (a) la distancia entre la señal de tráfico y el lector (b) el ángulo de rotación de la señal. El blindaje que presentan las ondas RF transmitidas es causado por el efecto de la placa metálica de la señal de tráfico, haciendo que se atenúen las lecturas del nivel RSSI de las etiquetas que se encuentran en la parte trasera de la señal. Gracias a estas variaciones se puede determinar la orientación de la señal.

El funcionamiento del sistema RFID embarcado en el vehículo se describe en la figura 5.20. Las señales de tráfico han sido equipadas con dos emisores (o etiquetas) RFID, las cuales transmiten su código de identificación y son detectadas por los lectores RFID colocados a bordo del vehículo. Esta información es transmitida a un PC dedicado, el cual determina la correspondencia entre los IDs y la señal dentro de una base de datos (la cual puede contener información geográfica sobre la zona donde están situadas las señales). Conjuntamente, este PC secundario se encarga de transmitir, a través de una conexión Ethernet, la nueva velocidad de consigna que debe seguir el vehículo autónomamente, así como otros datos útiles para el controlador del vehículo, ubicado en el PC principal embarcado.

5.3.3. Arquitectura para el control crucero basada en RFIDs

El esquema del control crucero, utilizando sensores RFID colocados en la infraestructura, se muestra en la figura 5.21. Consta de dos partes: las etiquetas RFID colocadas en las señales de tráfico y los sistemas de a bordo del vehículo.

El control de un vehículo autónomo, tal como se ha explicado en la sección 2.4.3 se realiza en tres etapas: percepción del entorno (adquisición de datos a través de sensores), decisión y acción de control. La etapa de percepción para el control longitudinal capta la información proveniente del entorno y del propio vehículo, trasladándola al ordenador donde se encuentra el sistema de control. Existen tres entradas sensoriales: la detección de señales de tráfico utilizando RFID activos (esto se realiza a través de un PC secundario embarcado en el vehículo y comunicado con el PC principal vía Ethernet); un receptor GPS que permite conocer en todo momento la posición en la que se encuentra el vehículo; y, por último, un sensor de efecto Hall, conectado a una de las ruedas delanteras del vehículo, y que ha sido explicado en la sección 3.4.2 de esta tesis.

La etapa de decisión es responsable de interpretar los datos obtenidos en la fase de percepción. Por una parte, se seleccionan los diferentes modos de conducción (en este caso, controladores) del vehículo. Estos controladores, basados en lógica borrosa (Naranjo et al., 2006b; Milanés et al., 2009a; Pérez et al., 2011a), han sido diseñados para tener en cuenta

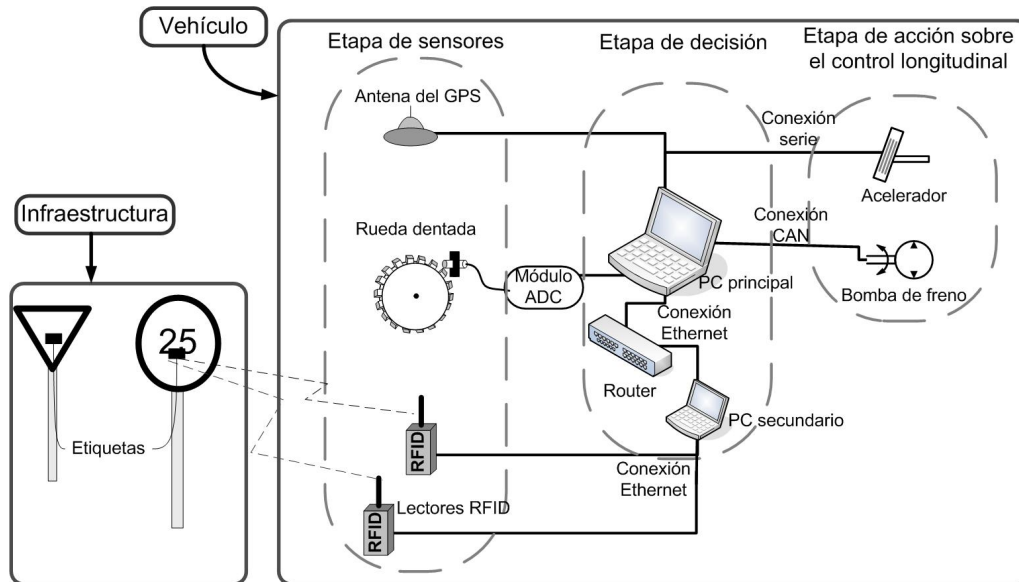


Figura 5.21: Esquema de control a bordo del vehículo y la interacción con la infraestructura

las diferentes situaciones en el tráfico para el control longitudinal: en segmentos rectos, seguimiento en curvas, intersecciones, control de cruceo adaptativo, adelantamientos, entre otros. Para evaluar el comportamiento del sistema propuesto en esta sección, solo se utilizará el controlador longitudinal.

La etapa de acción se encarga del control de los actuadores involucrados, en este caso: el acelerador y el freno. Su función es adaptar la salida generada por el controlador, para así evitar sobre picos, saturaciones o valores fuera de rango. Los actuadores han sido modificados para realizar una conducción autónoma. Para el acelerador se ha instalado una tarjeta analógica conectada un potenciómetro que emula la acción del pedal, según se ha mencionado en la sección 3.4. La acción del freno es la más crítica, ya que debe ser capaz de detener al vehículo en caso de alguna situación de emergencia o fallo del sistema. En este sentido, un bomba de freno electro-hidráulica ha sido instalada en paralelo al sistema de freno proporcionado por el fabricante. Los detalles del sistema de frenado se explican en (Milanés et al., 2010a).

5.3.4. Resultados experimentales del control cruceo basado en RFIDs

Para validar el sistema de control cruceo utilizando la información proveniente de la infraestructura a través de sensores RFIDs, se han realizado pruebas en el circuito del CAR. Dos tipos de experimentos han sido llevados a cabo: los primeros permiten determinar la fiabilidad en la detección de las señales de tráfico. El segundo experimento permite evaluar la versatilidad del sistema propuesto en esta tesis, utilizando la información del entorno.

5.3.4.1. Pruebas utilizando RFIDs

La figura 5.22 muestra la lectura de las etiquetas RFID colocadas en las señales de tráfico, tanto en su parte frontal como trasera. El indicador RSSI ha sido medido a diferentes velocidades (6, 12 y 24 km/h, figuras 5.22a, 5.22b y 5.22c). El origen del eje del tiempo es el momento en que el coche pasa por delante de dichas señales.

En la figura 5.23 se muestra una distribución estadística de la intensidad - RSSI - de

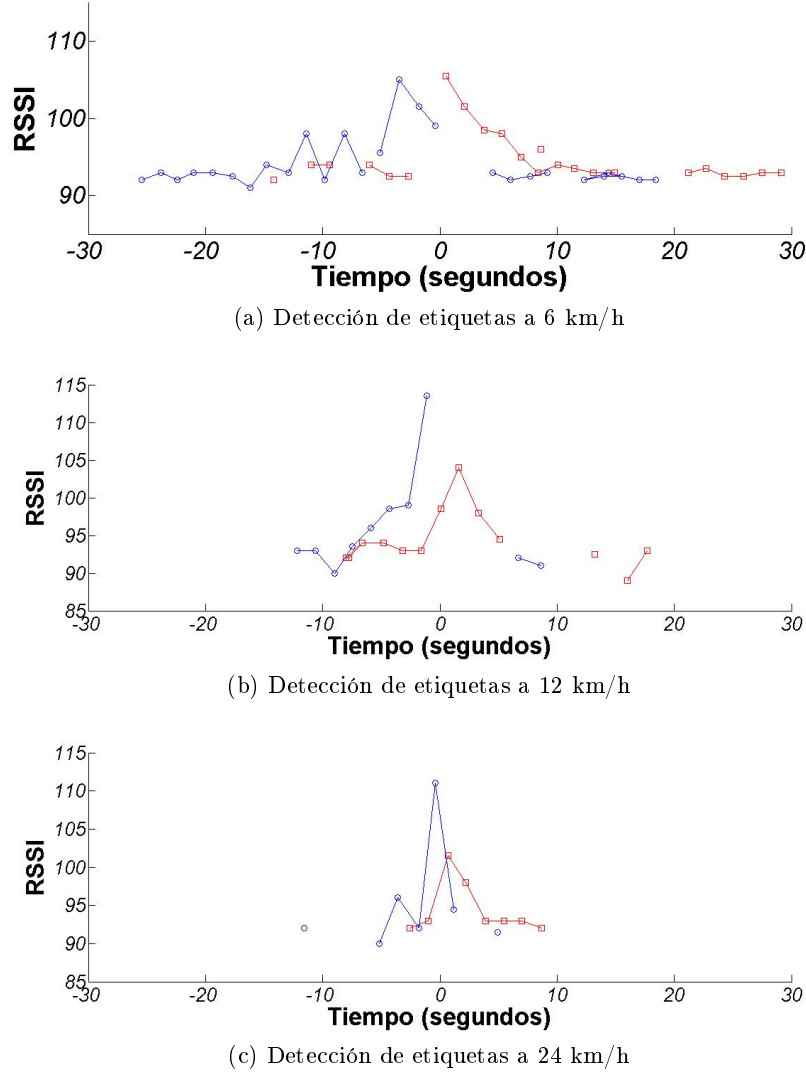


Figura 5.22: Lectura de las etiquetas RFID desde la parte frontal (azul) y trasera (roja) de las señales de tráfico a diferentes velocidades longitudinales del vehículo

las etiquetas instaladas en las señales de tráfico, en función de la distancia, y considerando las etiquetas instaladas en la parte frontal y trasera, a partir de los datos recogidos en la figura 5.22.

Puede observarse que los valores del RSSI disminuyen proporcionalmente al aumentar la distancia a la señal, y que las etiquetas ubicadas en la parte trasera de la señal se detectan dentro de un rango menor, y con un nivel de intensidad menor. Sin embargo, cada valor de lectura no es predecible debido a la gran variedad de factores que afectan la medición. Para ello se ha estimado un modelo de pérdidas por trayectoria según la ecuación:

$$RSSI = RSSI_0 - \alpha \log(d) \quad (5.12)$$

La ecuación 5.12 ha sido ajustada en función de los datos de los experimentos descritos en la figura 5.23, como se aprecia en las líneas de tendencia.

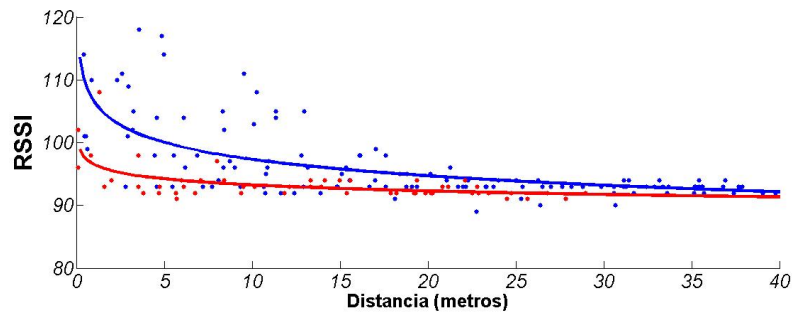


Figura 5.23: Distribución estadística de las lecturas de la intensidad de las señales de tráfico (RSSI) en función de la distancia, para etiquetas frontales (azules) y traseras (rojas). Y un modelo con las pérdidas por trayectoria que mejor se adapta a la pérdida de potencia de la señal, ecuación 5.12

5.3.4.2. Sistema autónomo

El experimento consiste en recorrer el circuito que se muestra en la figura 5.24, ajustando de forma automática las velocidades de referencia recibidas de las señales RFID, descritas en la tabla 5.2. Los recuadros indican la posición de cada una de las señales, y las aspás indican la posición, sobre la ruta, donde se ha detectado por primera vez cada lectura de los RFIDs.

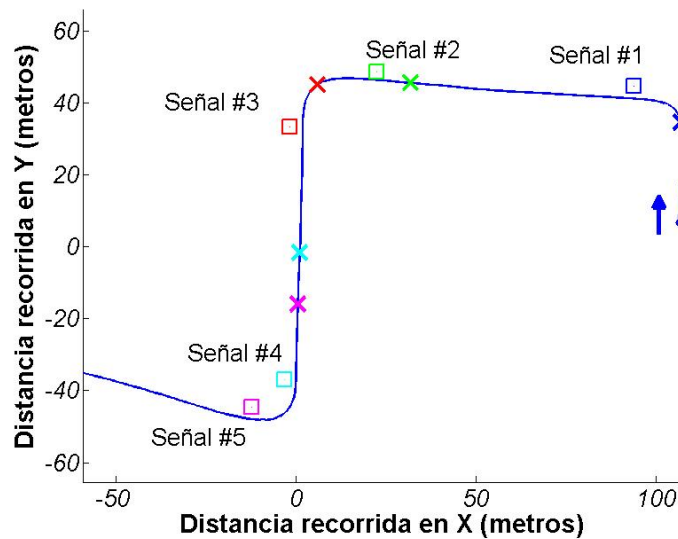


Figura 5.24: Recorrido utilizado para el control longitudinal del vehículo, con los posiciones de las señales de límite de velocidad junto a la carretera

La velocidad del vehículo se mantiene constante al principio del experimento en su valor inicial (8 km/h) y luego aumenta en el primer tramo recto en la carretera, según se lo indica la señal 1 de figura 5.24. Esto ocurre hasta que los lectores embarcados en la furgoneta detectan las señales de alerta en tramos curvos (señales 2 y 4, figura 5.24), obligando a que el vehículo disminuya la velocidad de referencia. La señales 3 y 5, situadas a las salidas de las curvas, indican que el vehículo puede acelerar de nuevo hasta alcanzar el límite

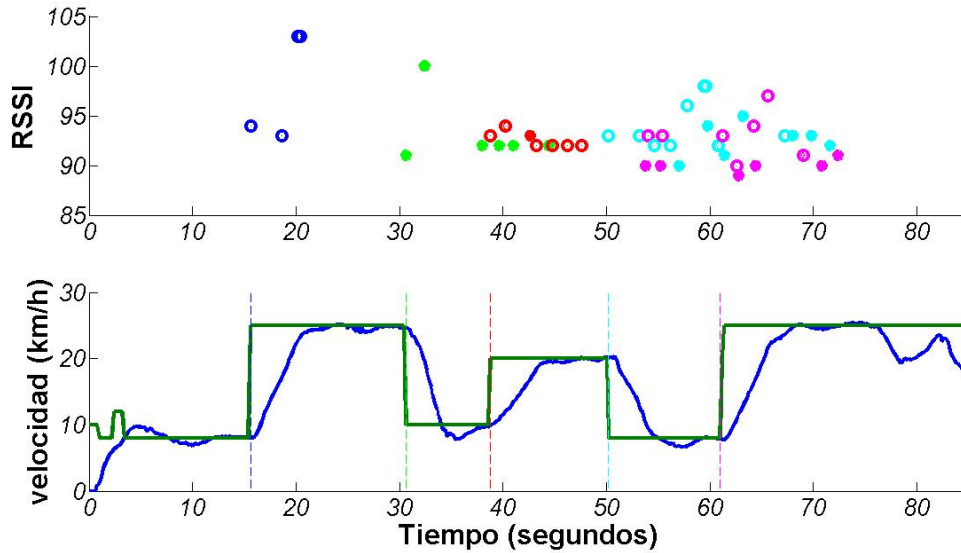


Figura 5.25: (a) Detección de las señales RFID en función del tiempo del recorrido; (b) Cambios en la velocidad de referencia (verde) y la velocidad real (azul) del vehículo de acuerdo con la información de cada señal

establecido para cada tramo (según la tabla 5.2).

La figura 5.25 muestra las lecturas de las etiquetas RFID cuando el vehículo recorre el trayecto mencionado. Estas son: la detección de cada etiqueta, los identificadores asociados, y los valores de intensidad (RSSI) de la señal recibida. El nivel de intensidad RSSI es inversamente proporcional a la distancia a la señal, aunque una relación exacta no es aplicable en vista de los resultados de las figuras 5.22c y 5.23.

Estas variaciones dependen de un gran número de factores, como: pérdidas de espacio libre, refracción, difracción, reflexión, apertura media por pérdidas de acoplamiento, absorción, entre otros. En promedio, las señales de tráfico se han detectado por primera vez a unos 23 metros de distancia (el mínimo 9 metros para la señal 2, el máximo de 40 metros para la señal 5, según los datos de la figura 5.25). También incluye la velocidad a la que se circula.

Como puede observarse, algunas veces la detección de la etiqueta corresponde a las señales que se encuentran más adelante (esto ocurre sobre todo entre las señales 4 y 5, debido a su proximidad), haciendo que se produzca un solapamiento en la detección, ya que ambas señales se encuentran, al alcance de los receptores. Por este motivo, el algoritmo de control embarcado en el vehículo cambia la velocidad de referencia del vehículo a la primera detección de la etiqueta RFID asociada con una señal de tráfico, de acuerdo con la información transmitida por él, y la mantiene durante un intervalo de tiempo. En el caso de las señales de tráfico 4 y 5 (que se han colocado muy cerca), las detecciones de etiquetas se han producido muy próximas en el tiempo. En este caso, el programa de control introduce un retardo para mantener la consigna correspondiente al segmento en el que se encuentra (8 km/h para curvas pronunciadas). Este retraso depende de la velocidad media del vehículo, la separación entre las señales de circulación (dato conocido, ver tabla 5.2), y la rapidez con la que el controlador del vehículo puede cambiar su consigna. Se puede observar (figura 5.25) como el sistema de control presentado en esta sección produce buenos resultados en la práctica.

5.4. Movimiento en marcha atrás

A lo largo de esta tesis se describen diferentes aportaciones dentro del campo de la robótica móvil en circuitos exteriores. El sistema de navegación de un vehículo autónomo depende en gran medida del método para determinar el camino de referencia y las estrategias de control que utilicen para su seguimiento. En los últimos años, los sistemas de posicionamiento global o GPS han permitido una evolución considerable en el cálculo de rutas y en la cartografía. Así nos podemos encontrar dispositivos comerciales con opciones como: rutas más cortas, alternativas, más rápidas, sin peajes, entre otros. El mayor problema lo encontramos cuando ocurre una situación inesperada, esto es: un accidente de tráfico, cierre de carreteras, obras, entre otras. En muchas ocasiones, salir de estos accesos bloqueados supone utilizar la marcha atrás. En este sentido, en esta sección se presenta un sistema de guiado para vehículos autónomos, que permite la implementación de la conducción hacia adelante (presentada en el capítulo 3), así como en marcha atrás, cuando sea necesario. Los controladores, basados en lógica borrosa, muestran buenos resultados, presentando una alternativa interesante para la salida de calles bloqueadas o ciegas.

5.4.1. Trabajos previos

Recientemente, el seguimiento de trayectoria, la evitación de obstáculos y el control lateral en vehículos autónomos son algunos de los temas más abordados por diferentes grupos de investigación dentro de los sistemas ITS. En esta línea, se plantea la necesidad de solucionar uno de los problemas, dentro de entornos urbanos, que plantea mayor dificultad para los conductores: la salida de las calles ciegas utilizando la marcha atrás.

Desde el punto de vista de control, la maniobra de conducción en marcha atrás tiene muchas aplicaciones en el campo de los vehículos autónomos. Algunos de estos ejemplos son: coches con remolques (Pradalier y Usher, 2007), camiones (Chen y Zhang, 1997) y aparcamientos (Hsu et al., 2008; Diem y Pasquier, 2008), entre otros. El laboratorio de información y tecnologías de las comunicaciones -ICT-, en Brisbane-Australia, ha presentado un método para la estabilidad de un coche con remolque que ejecuta un movimiento en marcha atrás. El sistema se basa en un controlador PI que utiliza el ángulo de guiñada del remolque (Pradalier y Usher, 2007).

Dentro del campo de robótica móvil, se han realizados diversos desarrollos en sistemas de navegación, localización y evitación de obstáculos. Por ejemplo, en (Bodhale et al., 2009) se han aplicado algoritmos de planificación, utilizando cámaras de visión, basados en la integración de rutas a través de filtro de partículas con el método de localización -MCL- (Dellaert et al., 1999). La perspectiva que han adoptado en su investigación se centra en entornos dinámicos, donde los robots pueden definir nuevas rutas. Sin embargo, no consideran caminos establecidos, como calles o carreteras, en el caso de vehículos reales.

Dentro de esta línea, otro ejemplo en trabajos con vehículos no tripulados ha sido desarrollado por la Universidad del Sur de Australia, específicamente para control de operaciones militares y con la idea de evitar bajas de vidas humanas (Kunchev et al., 2006). Ellos han probado diferentes técnicas para la generación de trayectorias, como: búsqueda heurística, gráficos de visibilidad y generación de diagramas por el método de Voronoi, para la planificación de rutas y evitación de obstáculos, centrándose especialmente en vehículos -AUV- (*Autonomous Underwater Vehicles*), diseñados para recoger datos en entornos inexplorables para el personal militar.

Otros grupos han obtenido resultados simulados en entornos dinámicos, basándose en sistemas de posicionamiento y construcción de mapas SLAM (Menglong et al., 2008). Esta

técnica permite resolver el problema de localización en carreteras con obstáculos dinámicos, utilizando un filtro de Kalman, minimizando el error de localización del vehículo. En la misma línea, en (Pepy et al., 2006) se han utilizado modelos cinemáticos y dinámicos de vehículos, basándose en la información procedente de odómetros embarcados, para solucionar los problemas de localización y navegación.

En (Dissanayake et al., 2001) han implementado el sistema SLAM en un vehículo real para exteriores y utilizando un radar de alta frecuencia -EHF-. Sus resultados muestran que es posible empezar en un punto desconocido del entorno utilizando observación relativa. Los dos principales problemas que presenta este sistema son: estimar la posición del vehículo, y la gran cantidad de información sobre el entorno que el SLAM necesita.

La lógica borrosa ha sido utilizada para resolver el problema de la marcha atrás con camiones (Chen y Zhang, 1997). Aunque estos resultados son buenos, solo han sido validados en simulación. Por último, la maniobra de parking automático se considera, hoy en día, un problema resuelto, e implementado en vehículos de alta gama, por ejemplo el sistema *Park Mate* desarrollado por Siemens con sensores de ultrasonido. Sin embargo, el control se realiza en lazo abierto y solo para estacionamiento en línea, partiendo de una posición inicial y se moviendo el volante según las instrucciones pre-configuradas y evitando la colisión con el vehículo trasero (Hsu et al., 2008). Además se requiere de un espacio de 1.5 veces el tamaño del vehículo. Todas estas maniobras involucran la acción autónoma del volante, el acelerador y el freno del vehículo, aunque, hasta ahora las acciones sobre la palanca de cambios no han sido consideradas en la literatura.

Dentro del grupo AUTOPÍA, existen algoritmos para detección de peatones (Llorca, 2008) y adelantamientos (sección 5.2). Sin embargo, en muchos es necesario dar marcha atrás y buscar otra ruta. En esta sección se describe una extensión de la arquitectura de control lateral presentada en el capítulo 3 de la presente tesis, para realizar el movimiento en marcha atrás en vehículos autónomos. El problema de búsqueda de caminos alternativos se asume resuelto, ya que se encuentra en sistemas comerciales. Por otra parte, se ha implementado un cambio de marchas automático desde el programa principal de control. A continuación se muestra la plataforma, el controlador utilizado y los resultados experimentales obtenidos en el movimiento en marcha atrás y en la salida de calles bloqueadas.

5.4.2. Escenario y modificaciones hechas al vehículo de pruebas

Las pruebas que se presentan en esta sección han sido realizadas en las instalaciones del CAR (sección 2.4). En la figura 5.26 puede apreciarse el mapa utilizado en el segundo experimento del movimiento de la marcha atrás, descrito más adelante. Algunos puntos del mapa se encuentran fuera de las pistas asfaltas. La detección del camino bloqueado se realiza a través de una señal de alarma, utilizando una etiqueta RFID, tal como se ha descrito en la sección 5.3.

El vehículo utilizado para las pruebas es *Babieca* (sección 2.4.1) y el esquema de control se ha descrito en el capítulo 3 (figura 3.1). Para los experimentos descritos en esta sección se ha utilizado la misma instrumentación descrita, aunque se ha añadido la palanca de cambios. Ésta tiene cuatro estados posibles: *Aparcar* (P), *Marcha atrás* (R), *Neutro* (N) y *Marcha adelante* (D).

Al igual que la mayoría de los vehículos automáticos comerciales, la palanca de cambios de la furgoneta funciona como un potenciómetro, la cual envía un voltaje de referencia a la caja de cambios que indica en que marcha se debe circular. Por lo tanto, el cambio de la posición de la palanca puede realizarse desde el ordenador de a bordo, cortocircuitando la salida de dicha palanca con un módulo digital analógico.

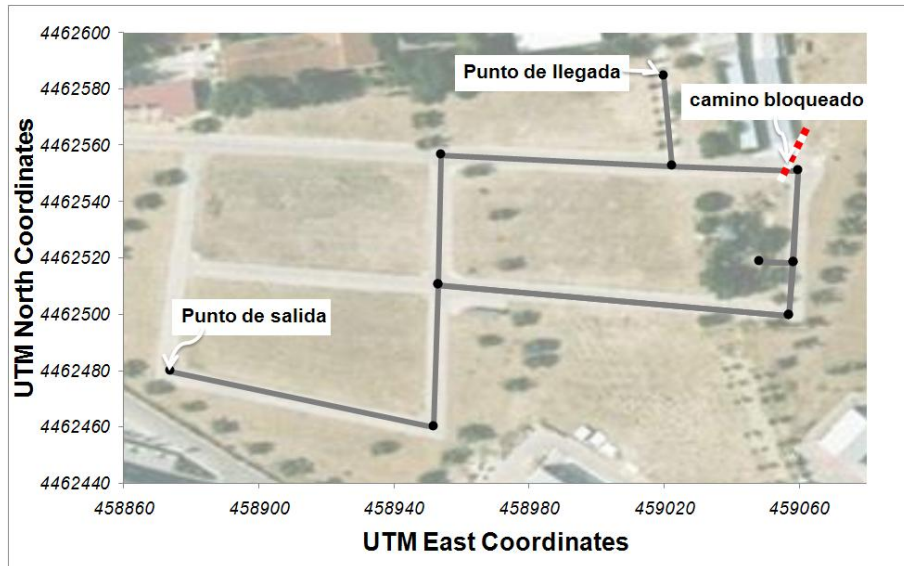


Figura 5.26: Recorrido establecido para la salida de calles bloqueadas en la pista de pruebas del CAR

Marcha	Voltaje
<i>Aparcar (P)</i>	0.9
<i>Marcha atrás (R)</i>	1.7
<i>Neutro (N)</i>	2.5
<i>Marcha adelante (D)</i>	3.3

Tabla 5.3: Voltajes de referencia para la palanca de cambios

En la figura 5.27 se muestran los diferentes actuadores utilizados en la furgoneta. En la parte superior a derecha e izquierda se muestra el módulo DAC utilizado para cambiar las marchas y el cableado hecho sobre la palanca de cambios, respectivamente. En la parte inferior se muestra el actuador utilizado para el volante y la bomba de freno instalada en el vehículo (capítulo 3 y (Milanés et al., 2010a)). Los voltajes de referencia para cada una de las marchas se muestran en la tabla 5.3.

5.4.3. Controlador para la marcha atrás

Como se ha repetido a lo largo de esta tesis, la lógica borrosa permite, trasladar el conocimiento humano a procesos cotidianos, como la conducción de un vehículo. En este sentido, se ha partido de la arquitectura para el control lateral descrita en el capítulo 3, modificando el controlador borroso de alto nivel para abordar el problema propuesto.

En la sección 2.4.2 se ha descrito la sintaxis del motor de inferencia borrosa (ORBEX). Debido a que el objetivo del controlador en marcha atrás es mover el vehículo en sentido contrario, se sustituyeron las reglas relativas a la posición del volante por sus duales. Las reglas asociadas a la velocidad angular se dejaron igual, ya que no afectan al desempeño del vehículo. A continuación se mencionan las reglas, implementadas en el movimiento en marcha atrás:



Figura 5.27: Vehículo utilizado en el movimiento en marcha atrás

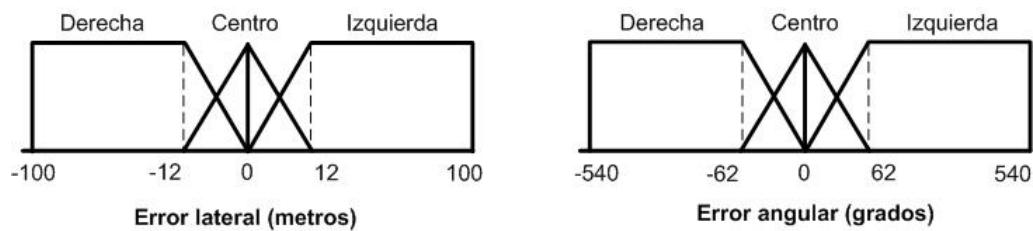


Figura 5.28: Funciones de pertenencia para el volante en la marcha atrás

SI *Error lateral* Izquierda **ENTONCES** *Posición volante* Izquierda

SI *Error lateral* Centro **ENTONCES** *Posición volante* Mantener

SI *Error lateral* Derecha **ENTONCES** *Posición volante* Derecha

SI *Error angular* Izquierda **ENTONCES** *Posición volante* Izquierda

SI *Error angular* Centro **ENTONCES** *Posición volante* Mantener

SI *Error angular* Derecha **ENTONCES** *Posición volante* Derecha

Debido a la cinemática del vehículo (ya que la dinámica no se considera a bajas velocidades), las funciones de pertenencia del controlador de posición para el movimiento de la marcha atrás se han ajustado ligeramente, y se muestran en la figura 5.28. Los valores de los singleton de salida son los mismos que se utilizaron en el controlador descrito en la capítulo 3, en la sección 3.5.2.3.

5.4.3.1. Diagrama de estados para el movimiento en marcha atrás

Una vez definido el controlador para el movimiento en marcha atrás, es necesario definir un algoritmo de decisión que determine cuando debe activarse cada modo de conducción. La figura 5.29 muestra el diagrama de estados implementado para la conducción hacia adelante y en marcha atrás. Se observa que una vez que ha empezado la conducción hacia un destino definido, se verifica si existe algún obstáculo que pueda interrumpir el recorrido.

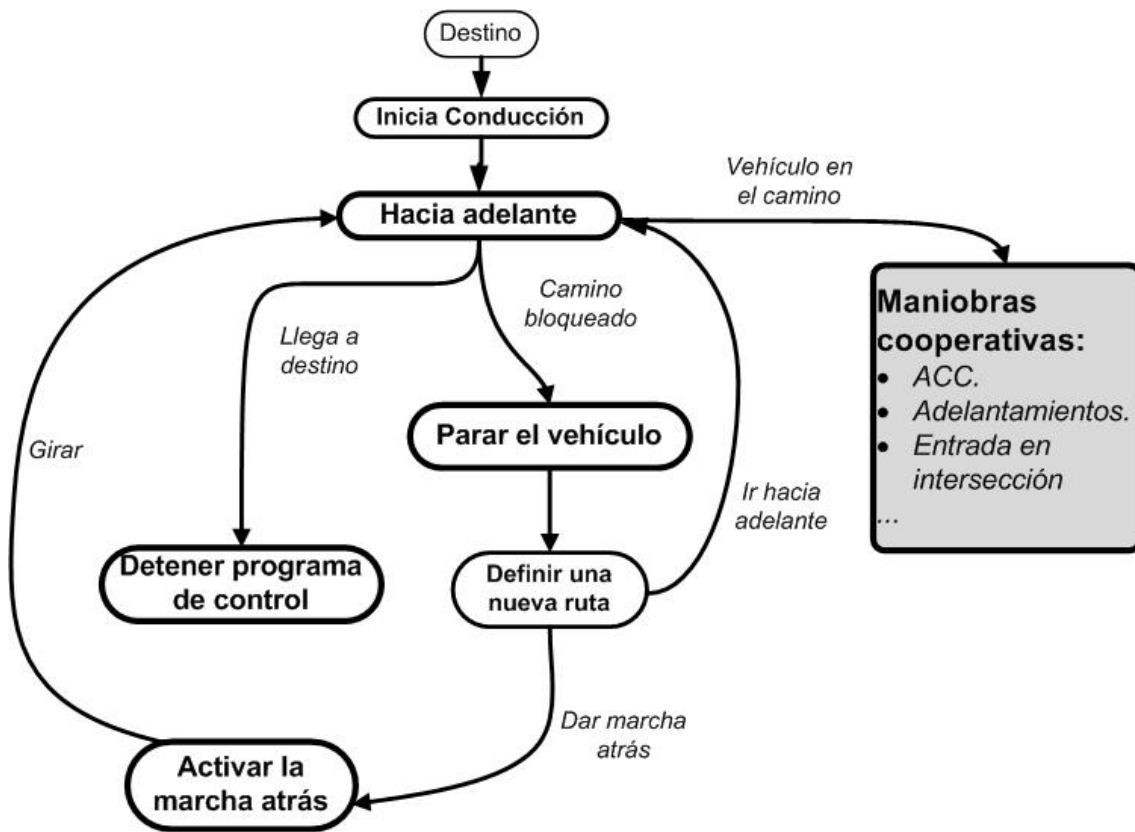


Figura 5.29: Diagrama de estados para la conducción hacia adelante y en marcha atrás

Si encuentra un vehículo delante, se activa el controlador para adelantamientos descrito en la sección 5.2, mientras que si el camino se encuentra totalmente bloqueado, se define una nueva ruta y si es necesario se efectúa el movimiento en marcha atrás. Cuando el vehículo encuentre un lugar donde girar, volverá a la conducción hacia adelante, con la nueva ruta definida, hasta su destino final. En este diagrama de estados se asumen solucionadas diferentes maniobras cooperativas que han sido desarrolladas previamente: ACC, adelantamientos y entrada a intersecciones (Milanés et al., 2009a; Pérez et al., 2010a; Milanés et al., 2010d).

5.4.4. Experimentos

Con el fin de validar el funcionamiento del esquema de control presentado en esta sección, se han realizados dos tipos de experimentos. Los primeros muestran cómo se comporta el vehículo circulando en marcha atrás. Mientras que el segundo muestra como el sistema de control, acoplado al propuesto en el capítulo 3 de la presente tesis, es capaz de salir de calles bloqueadas, definir una ruta alternativa, dar marcha atrás y llegar a su destino final.

5.4.4.1. Seguimiento de trayectorias en marcha atrás

Los experimentos de seguimiento de trayectorias predefinidas en marcha atrás se muestran en la figura 5.30. Todos han sido realizados en las instalaciones del CAR. En el primer experimento se ha seguido un circuito en forma de ocho, con cuatro curvas a la derecha y otras cuatro a la izquierda, todas se aproximan a los noventa grados. En el segundo

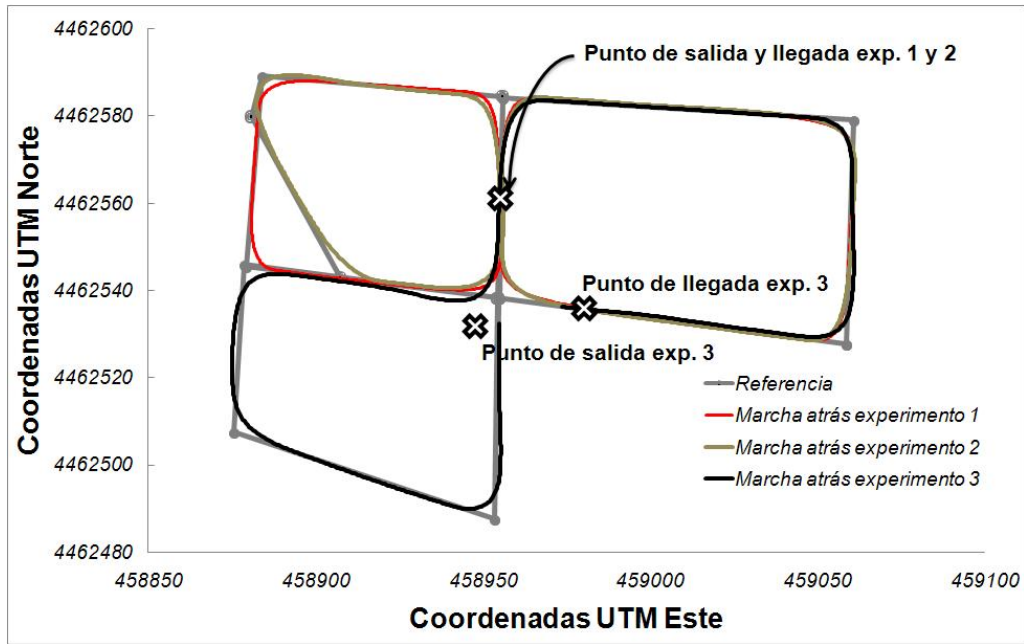


Figura 5.30: Seguimiento de trayectorias en marcha atrás en distintos tramos urbanos

Experimento	Error RMSE		
	1	2	3
Rectas	0.315	0.321	0.59
Curvas	0.9363	0.967	1.13
Total	0.522	0.524	0.71

Tabla 5.4: RMSE en el movimiento en marcha atrás

experimento se ha utilizado un segmento de nuestras pistas, con curvas diferentes (grafica marrón de la figura 5.30). En estos experimentos la velocidad de referencia ha sido 8 km/h.

En el último experimento (grafica negra de la figura 5.30) se ha utilizado un trazado diferente. También se ha modificado la velocidad de referencia en los diferentes tramos, desde los 8 km/h hasta los 16 km/h. Por ello estas pruebas son las que registran el mayor error, tanto en tramos rectos como curvos (tabla 5.4). El controlador presentó oscilaciones para velocidades mayores a los 16 km/h en tramos curvos. Esto se debe a que se han utilizado las mismas funciones de pertenencia de la velocidad angular del volante que se describieron en el capítulo 3 para el controlador para la conducción hacia adelante, y la dinámica del vehículo no es la misma cuando circula en marcha atrás.

La Tabla 5.4 muestra que los errores en los primeros experimentos son siempre menores a 1 metro, mientras para velocidades superiores, se supera ligeramente este valor, aunque el vehículo se mantiene siempre dentro del carril.

5.4.4.2. Experimento utilizando ambos controladores

Este experimento ha sido diseñado para que el vehículo pueda circular tanto hacia adelante como hacia atrás. Se considera una ruta inicial, la cual debe cambiar a causa de que el camino está bloqueado, redefiniendo la ruta y, en consecuencia, activando el controlador

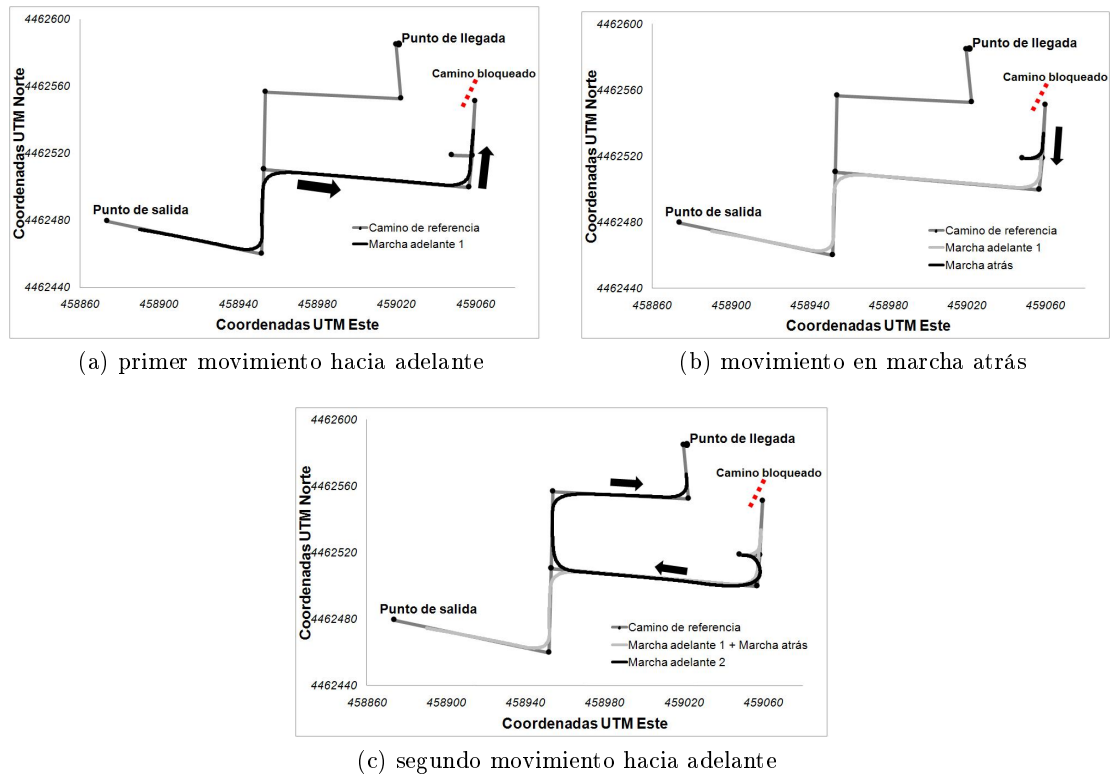


Figura 5.31: Experimento utilizando el movimiento hacia adelante y en marcha atrás

Experimento	Error (RMSE)		
	Marcha adelante	Marcha atrás	Total
Rectas	0.422	0.186	0.409
Curvas	0.904	0.518	0.878
Total	0.631	0.332	0.612

Tabla 5.5: RMSE en el movimiento en marcha atrás

de marcha atrás para poder alcanzar el destino final. Las velocidades de referencias han sido fijadas en: 6 km/h para el arranque, 12 km/h para segmentos rectos y curvos, y 7 km/h para el movimiento en marcha atrás.

La figura 5.31 muestra la secuencia de ejecución de esta maniobra: Marcha adelante (a), marcha atrás (b) y luego vuelve a marchar adelante (c). La ruta de referencia es la que ha sido mostrada en la figura 5.26. Cuando el vehículo detecta un obstáculo que no puede superar, a través de una señal RFID colocada en el sitio del incidente (sección 5.3), éste se detiene y evalúa la posibilidad de otra ruta, como se muestra en la figura 5.31a (para la definición de la nueva ruta, se ha utilizado un algoritmo sencillo que busca la ruta más corta para llegar al punto deseado. El detalle del algoritmo de definición de rutas alternativas escapa al alcance de esta tesis, que están implementados en los sistemas de navegación modernos). Luego, el sistema de control realiza un cambio de marcha (según el diagrama de estado de la figura 5.29) y efectúa el movimiento en marcha atrás hasta que el vehículo encuentra un punto en el mapa donde puede girar (figura 5.31b). Una vez hecho el giro, el vehículo se detiene nuevamente, reinicia la posición del volante, cambia

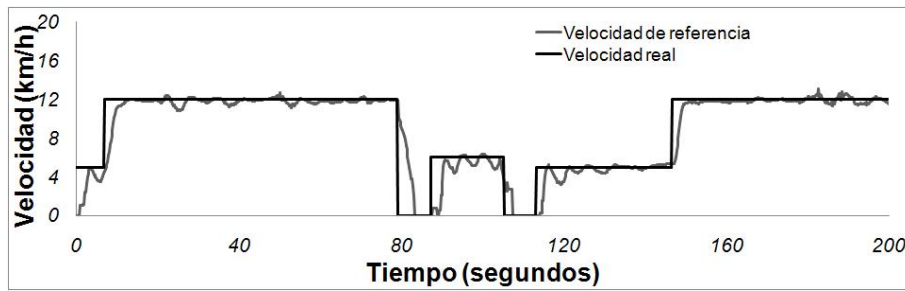


Figura 5.32: Velocidad durante el experimento 5.31

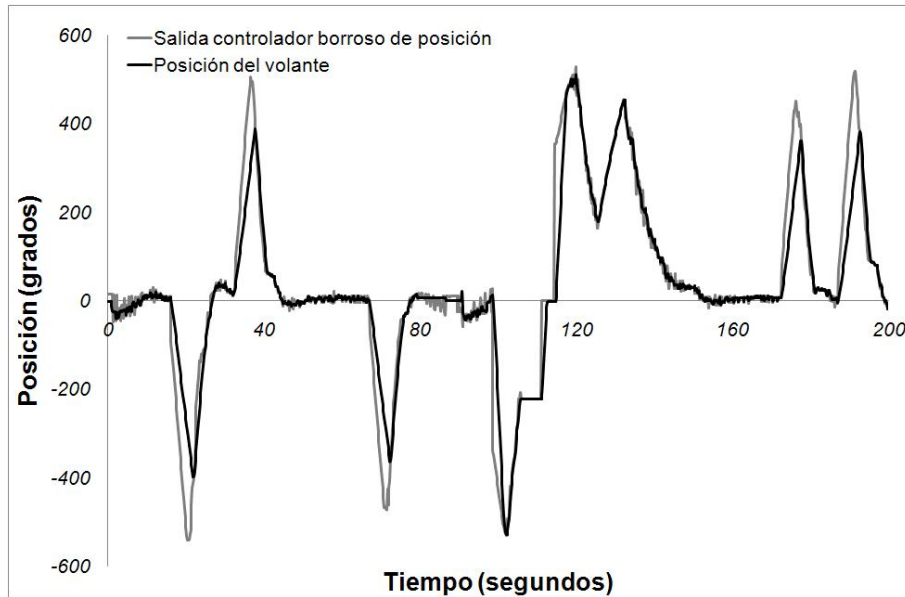


Figura 5.33: Salida del controlador y posición del volante en el experimento 5.31

la marcha y utiliza el controlador en marcha hacia adelante, hasta su destino final (figura 5.31c).

En la figura 5.32 se aprecia la velocidad real y la de referencia durante todo el experimento. Alrededor del segundo 80 el vehículo detecta el obstáculo y se detiene, luego durante el movimiento en marcha atrás, fija la velocidad en 7 km/h, y se vuelve a detener sobre los 105 segundos. Debido a que el vehículo debe realizar un giro muy fuerte una vez que recupera la marcha hacia adelante, la velocidad de arranque se mantiene en 6 km/h, y luego vuelve a establecerse en 12 km/h cuando se encuentra nuevamente en un segmento recto, y hasta que llega a su destino final.

Por último, la salida del controlador y la posición real del volante durante todo el experimento se muestra en la figura 5.33. Podemos observar como el volante sigue la referencia indicada por el controlador, aunque también se observa que en las curvas el volante no llega a su posición. Esto se debe al efecto del controlador de velocidad angular descrito en el capítulo 3. También es importante observar que sobre los 105 segundos, cuando se detiene el vehículo, el volante se mantiene en 220 grados, debido a que cuando el vehículo se detiene el sistema de control mantiene el volante en su última posición. Lo mismo ha ocurrido en la primera parada del vehículo, sobre el segundo 80. Una vez que el sistema de

control cambia la palanca para desactivar la marcha atrás, el volante va al centro, y luego gira completo al otro lado para salir de la calle bloqueada y llegar a su destino final. La tabla 5.5 muestra el error cuadrático medio calculado para este experimento, en función de los distintos tramos y marchas usadas.

5.5. Conducción en rotondas

En las últimas décadas, los ITS han ido incrementando su desarrollo e implementación, tanto en autovías como en áreas urbanas. Actualmente, varias aplicaciones y maniobras son consideradas de gran importancia dentro de la industria del automóvil, así como en el mundo de la investigación. Las diferentes investigaciones llevadas a cabo en sistemas de percepción, algoritmos de control, y actuadores son claros ejemplos de esta evolución (Shladover, 2007; Vaa et al., 2007). Sin embargo, algunas áreas de investigación dentro del campo de los ITS se han mantenido fuera de esta evolución, o se encuentran todavía en fases previas de desarrollo; el comportamiento de vehículos autónomos en rotondas es una de ellas. En esta sección, se propone una solución para el control autónomo de vehículos en rotondas. En primer lugar, y para demostrar el buen funcionamiento de la arquitectura planteada, se han realizado simulaciones en entornos virtuales (Pérez et al., 2011f), basados en vehículos eléctricos - Cybercars - (Boisse et al., 2007) y utilizando la arquitectura de control del programa AUTOPIA (Pérez et al., 2009, 2011e).

En una segunda etapa, se utilizan las ecuaciones paramétricas de la circunferencia para definir las trayectorias de vehículos autónomos en rotondas (Pérez et al., 2011b), teniendo en cuenta diferentes entradas y salidas, así como cambios de carril dentro de la misma.

Finalmente, partiendo de este concepto, y reajustando ligeramente el controlador borroso de alto nivel para el volante (descrito en el capítulo 3), se presentan los primeros resultados, utilizando vehículos autónomos reales en rotonda.

5.5.1. Planteamiento del problema

En las últimas dos décadas, las rotondas han pasado a ser, progresivamente, una alternativa cada vez más popular para hacer frente al problema de las intersecciones (Manage y Suzuki, 2003), aunque al mismo tiempo, se han convertido en un punto conflictivo para conductores (Abaza y Hussein, 2009). Prueba de ello, son los resultados alcanzados en diversos estudios realizados en Estados Unidos y China, los cuales demuestran que los conductores no tienen experiencia suficiente en el uso de rotondas, ocasionando atascos de tráfico en las proximidades de las mismas (Xiaoguang et al., 2004; Abaza y Hussein, 2009; Yu et al., 2009).

La gestión del tráfico en rotondas, sean éstas señalizadas o sin señalizar, ha sido estudiado en (Xiaoguang et al., 2004). Sin embargo, hasta ahora, sólo se ha considerado el problema desde el punto de vista de la señalización, esto es: límites de control de velocidad, características geométricas, e incluso gestores de flujo para monitorización (Yu et al., 2009; Molinete et al., 2009; Qian y Sun, 2008; Yu y Qin, 2009). Sin embargo, el control de vehículos autónomos en este escenario aún no ha sido considerado. Es por eso que, considerando el control en cascada explicado en el capítulo 3, se propone una solución para el control lateral de vehículos autónomos en rotondas.

En (Molinete et al., 2009) se definen las rotondas como una composición y convergencia de varias intersecciones en un mismo punto. Consecuentemente, el control sobre una rotonda puede acercarse al realizado sobre pequeños segmentos dentro de una circunferencia. En este sentido, una solución para la generación de trayectorias podría limitarse a

leer mapas previamente definidos. Esta solución tiene el inconveniente que no es genérica ya que cada rotonda puede tener diferente radio y número de entradas y salidas. Por eso en este trabajo se han considerado las condiciones geométricas de cada rotonda (centro en coordenadas cartesianas de 2 dimensiones - y radio de las mismas) para construir un mapa de referencia, utilizando ecuaciones paramétricas. Además se propone un esquema de control que permite seguir la nueva trayectoria generada, guiando a un vehículo autónomo en rotondas de uno y dos carriles de circulación.

En las simulaciones presentadas en esta sección se ha utilizado un controlador lineal que utiliza dos variables en el guiado: el error lateral y angular. Mientras que para la implementación real, en una de las furgonetas del programa AUTOPIA, se ha utilizado el controlador borroso, descrito en el capítulo 3, reajustando ligeramente sus funciones de pertenencia.

A continuación se especifican las condiciones y restricciones que han sido tomadas en cuenta para el control de las rotondas. Luego se mencionan los aspectos más importantes del simulador utilizado (Furda y Vlacic, 2009), junto con el esquema de control adaptado al mismo. Seguidamente, se explican todas las simulaciones previas a la implementación real. Al final de esta sección se describen los ajustes hechos en el controlador borroso utilizado en el volante, junto con la explicación del entorno de pruebas y los resultados obtenidos.

5.5.2. Condiciones y control en rotondas

Existen muchos tipos de rotondas; v.g.: en los cruces de carreteras éstas suelen ser de 2 hasta 6 carriles. En entornos urbanos algunas rotondas tienen un radio menor a 2 metros, e incluso otras incorporan semáforos para regulación de tráfico. Consecuentemente, es importante establecer el rango de acción donde está definido el esquema de control presentado en esta tesis. Las condiciones de validación del procedimiento son:

- El radio mínimo de la rotonda está condicionado al radio de curvatura del vehículo y al ancho establecido para el carril de circulación. En el caso de las simulaciones hechas con Cybercars, el radio de curvatura es de 2,5 metros, mientras que para la furgoneta (Citroën Berlingo) es de 6 metros. El ancho del carril en ambos casos es de 3 metros. En consecuencia, el radio mínimo para las simulaciones con Cybercars es de 4 metros, mientras que para el vehículo real es de 7,5 metros.
- Solo se han considerado rotondas con dos carriles en los experimentos. Aunque para las entradas y salidas se han considerado uno y dos carriles, según se muestra en la figura 5.34.
- El número de entradas y salidas está limitado a cuatro. Las calles adyacentes a la rotonda son, usualmente, perpendiculares a la línea tangente a la circunferencia en el punto de confluencia. Sin embargo, el sistema es válido para entradas y salidas con diferentes grados de inclinación (figura 5.34).
- Los experimentos solo consideran un vehículo circulando dentro de la rotonda. La cooperación con otros vehículos, dentro y fuera de la rotonda, se considerará en trabajos futuros.
- La velocidad está previamente establecida, aunque en el caso de la furgoneta ésta puede cambiar, gracias a las ventajas presentadas en la sección 5.3, utilizando etiquetas RFIDs. En las simulaciones, varias señales en la rotonda pueden enviar mensajes de cambios de consignas, así como alarmas para situaciones de emergencia (Vlacic et al., 2011). Esta sección se centra en el control lateral, la velocidad se mantiene constante.

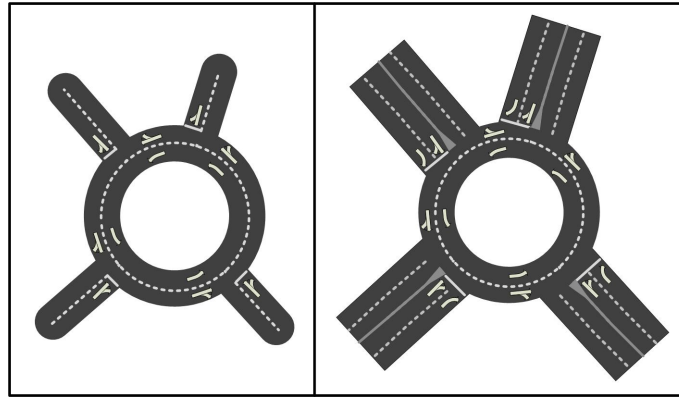


Figura 5.34: Rotonda con uno y dos carriles para las entradas/salidas (izquierda y derecha, respectivamente).

En la figura 5.35 se observa la dualidad del sistema, permitiendo utilizar controladores clásicos en entornos simulados, y técnicas de control inteligente para vehículos reales. Este esquema considera la información proveniente de los sensores, así como la localización, ruta predefinida y dimensiones de la rotonda. Al mismo tiempo, permite cambiar la salida previamente definida, una vez que el vehículo se encuentra dentro de la rotonda.

Existen dos importantes partes dentro del control de la dirección de vehículos autónomos (y en la robótica móvil en general): la generación ó lectura de la trayectoria, y la estrategia de control utilizada para el seguimiento. En esta sección se explicará la técnica de generación de trayectorias utilizada para rotondas (válida para el simulador ⁶ y vehículos reales), el sistema de control utilizado en cada caso y los diferentes escenarios de pruebas que se han dispuesto para la validación del sistema.

5.5.3. Esquema de control

El simulador utilizado en esta sección ha sido desarrollado por el grupo de investigación IMARA, del INRIA (Boussard et al., 2010), en el marco del proyecto Cybercars-2(Boisse et al., 2007). Está diseñado para Cybercars, y permite utilizar diferentes entornos, sensores y obstáculos, entre otros. Los detalles del entorno de simulación se mencionan en (Furda y Vlacic, 2009, 2010; Pérez et al., 2011b,e).

En la figura 5.35 se presenta el esquema de control de vehículos autónomos en rotondas. Siguiendo las instrucciones presentadas en (Pérez et al., 2009), se ha considerado en todo momento la modularidad como parte primordial del diseño de las diferentes aportaciones presentadas en esta tesis, permitiendo intercambiar bloques según se planteen diferentes condiciones y situaciones. En este sentido, la estructura presentada en la figura 5.35 es válida tanto para las simulaciones hechas con Cybercars, como para vehículos reales. Solo es necesario definir los controladores para cada caso (controlador clásico -simulador- y controlador borroso -furgoneta-). A continuación se describen cada una de las etapas, y sus respectivos bloques.

⁶Gracias a las estancias realizadas en la Universidad de Griffith (Brisbane, Australia) y el INRIA (Rocquencourt-Paris, Francia), el doctorando ha tenido acceso al simulador utilizado en esta sección.

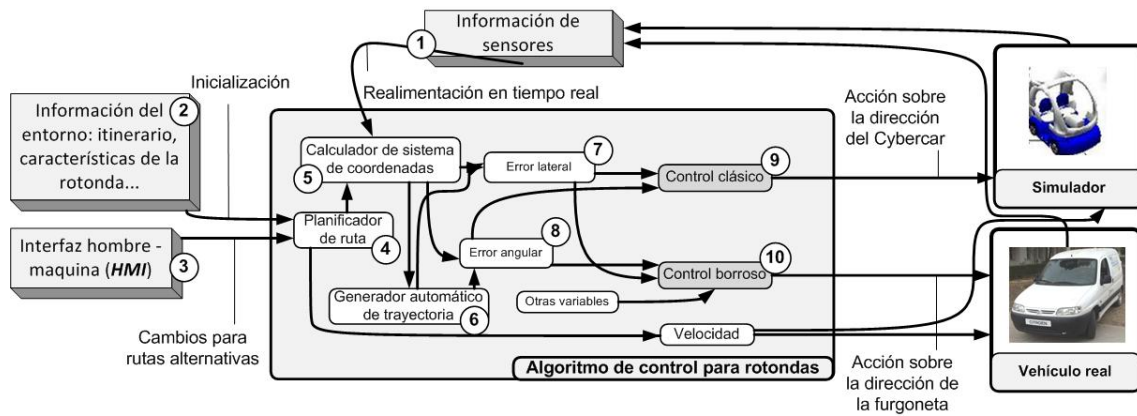


Figura 5.35: Arquitectura de control para vehículos autónomos en rotondas

5.5.3.1. Etapa de percepción

La etapa de percepción se encarga de recibir la información proveniente del entorno. Ésta es la única que se utiliza completamente en el simulador y en el vehículo real. Una vez que detecta cuando hay una rotonda delante (es decir: lee una señal de tráfico que lo indique), se activa el bloque de generación automática de trayectoria. El vehículo entra y sale en la rotonda a través de segmentos rectos, tal como se mencionó en el capítulo 3. A continuación se describe cada uno de los componentes:

- **1.-Información de sensores:** es el módulo encargado de recibir la información de los sensores de embarcados en el vehículo (simulado): el GPS y el láser. El primero proporciona la posición en coordenadas cartesianas. La información del láser se utiliza para activar la parada de emergencia en caso que se detecte un obstáculo imprevisto.
- **2.-Información del entorno:** se encarga de leer la ruta a seguir. Solo el radio de la rotonda y las coordenadas del centro de la misma son necesarios para generar el mapa. La información sobre la ruta, señales de tráfico y otras posibles salidas dentro de la rotonda puede leerse utilizando estructura de datos XML (*eXtensible Markup Language*) tal como se especifica en (Furda y Vlacic, 2009), o leyendo la información proveniente de las señales del entorno (Vlacic et al., 2011) para simulaciones, o con RFID para vehículos reales, sección 5.3).
- **3.-Interfaz Hombre-Máquina (HMI):** El sistema de control de un vehículo autónomo está programado para seguir una ruta predefinida (sección 2.4.3). Sin embargo, se ha desarrollado una interfaz HMI con la finalidad de probar la robustez del sistema de control propuesto en esta tesis. El usuario puede realizar cambios de carril, cambiar la velocidad de referencia, detener el modo de conducción autónomo y seleccionar nuevas salidas.

En resumen, la información suministrada por los tres primeros módulos proporciona la ruta, la posición global y las posibles variaciones en las condiciones iniciales. A continuación se describen los bloques encargados de procesar toda esta información:

- **4.-Planificador de ruta:** el vehículo empieza sus recorridos en segmentos rectos, por lo tanto, el planificador se encarga de leer los puntos de la ruta directamente desde el archivo XML. Cada ruta es cargada al inicio desde el módulo de *información del*

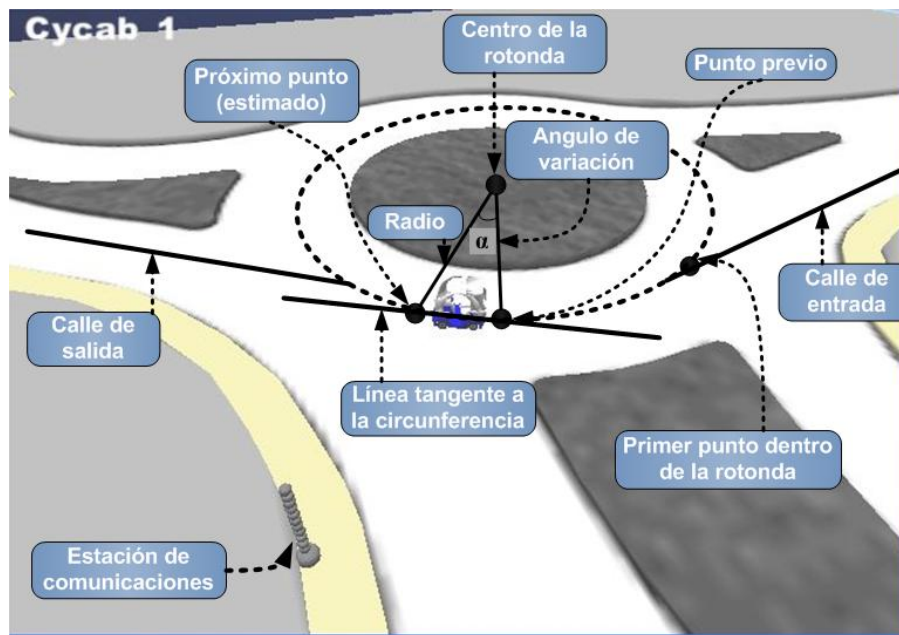


Figura 5.36: Puntos, calles y variables usadas en el generador automático de trayectoria para rotondas

entorno, aunque otras rutas alternativas pueden ser seleccionadas a partir de otros mapas. El planificador de ruta envía la posición de referencia al *calculador de sistemas de coordenadas*. El centro de la rotonda es considerado como una intersección con un radio asignado. Más adelante, el *Generador automático de trayectoria* se encargará de construir el nuevo mapa de la rotonda. Por último, este módulo establece la velocidad longitudinal de referencia asignada para cada segmento. Si se recibe bien una señal externa de tráfico bien una consigna nueva desde la HMI, la velocidad cambia.

- **5.- Transformación de coordenadas:** este módulo es necesario para trasladar el sistema de coordenadas (UTM para los GPS reales) a una nueva referencia, en función de la posición del vehículo. Este nuevo sistema de referencia permite calcular las variables de entrada para la etapa de control, las cuales son redefinidas cada vez que se lee un nuevo punto desde el *planificador de ruta*.
- **6.- Generador automático de trayectoria:** este módulo se activa cuando el vehículo está entrando en una rotonda. Considerando el radio, el centro de la rotonda y la posición actual del vehículo, se determina el valor inicial del el ángulo α de la ecuación 5.13. Éste es el ángulo de referencia inicial de la rotonda, y está definido entre $\pm\pi$. Para la generación del nuevo punto de destino intermedio en la rotonda (*Abscisa_X* y *Ordenada_Y*) se utilizan la ecuaciones paramétricas de la circunferencia (ecuación 5.13 y 5.14), además, el valor de α se va incrementado progresivamente en valor (que llamaremos Δ) de 0.1 radianes. Éste ángulo se va a decrementar o aumentar en función del sentido de circulación en la rotonda ⁷. El cambio de carril dentro de la rotonda se realiza modificando el valor del radio en función del ancho del carril.

⁷Debido a que las simulaciones fueron realizadas en la estancia del doctorando en Australia, el sentido de circulación de la rotonda en los experimentos es el ingles -horario-.

$$Abscisa_x = Radio * \cos(\alpha + \Delta) + CentroRotonda_{Abscisa} \quad (5.13)$$

$$Ordenada_y = Radio * \sin(\alpha + \Delta) + CentroRotonda_{Ordenada} \quad (5.14)$$

En la figura 5.36 se muestran los puntos, direcciones y variables asociadas al cálculo automático de la trayectoria en rotondas, que permiten calcular las variables de entrada del sistema de control. A continuación se describe el controlador implementado en el simulador.

5.5.3.2. Etapa de control

La etapa de control es la encargada de procesar las señales recibidas desde la etapa de percepción para generar la dirección que debe seguir el vehículo. Para ello, el sistema de control propuesto en esta tesis utiliza dos variables independientes: el error lateral y el error angular (bloques 7 y 8, figura 5.35). Los requisitos para calcular éstas las variables de entrada son: punto previo, próximo punto y línea tangente. Las variables son análogas a las descritas para el controlador de posición del volante (capítulo 3).

La ecuación 5.15 representa la acción de control para el vehículo simulado.

$$Volante = K_1 * Errorlateral - K_2 * Errorangular \quad (5.15)$$

Donde $K_1 = 0,2$ y $K_2 = 0,019$. Ambas han sido estimadas empíricamente. Es importante mencionar que etapa de acción (en el simulador) se reduce al límite de la salida del volante en los Cybercars, la cual está definida entre -0.5 y 0.5, donde el negativo es el valor máximo a la izquierda y viceversa. Esto condiciona las ganancias establecidas para el controlador.

Bajo condiciones especiales (velocidad constante, no derrape en los neumáticos, entre otras) este controlador puede aproximarse a un controlador Proporcional-Derivativo, ya que existe una relación lineal entre el ángulo de guiñada y la derivada del error lateral (Kosecka et al., 1998; Sotelo, 2003). Sin embargo, y dado que estas condiciones no son aplicables a entornos con velocidades variables y condiciones reales, el autor prefiere utilizar el término *controlador proporcional multivariable* (módulo 9 de la figura 5.35).

5.5.4. Resultados experimentales en entornos simulados

Diferentes escenarios han sido simulados para demostrar el buen funcionamiento de la arquitectura propuesta en la figura 5.35 para la conducción de vehículos autónomos en rotondas. En primer lugar, se ha puesto a prueba el controlador proporcional multivariable en un segmento recto y dentro de un circuito urbano, realizando diferentes cambios de carril. Luego, se ha simulado la generación de trayectoria, considerando diferentes radios, entradas y salidas. Por último, simulaciones con todo el sistema integrado, considerando cambios de carril, entrada y salida en la rotonda, han sido llevadas a cabo con éxito.

5.5.4.1. Seguimiento de trayectoria y cambio de carril

En la figura 5.37 se muestra el seguimiento de trayectoria utilizando el controlador proporcional multivariable con tres carriles: central, derecho e izquierdo. El camino de referencia o carril central está representado con la línea gris unida con puntos en las esquinas. Las líneas continuas, con trazos pequeños y con puntos corresponden al comportamiento del vehículo en los carriles central, derecho e izquierdo respectivamente.

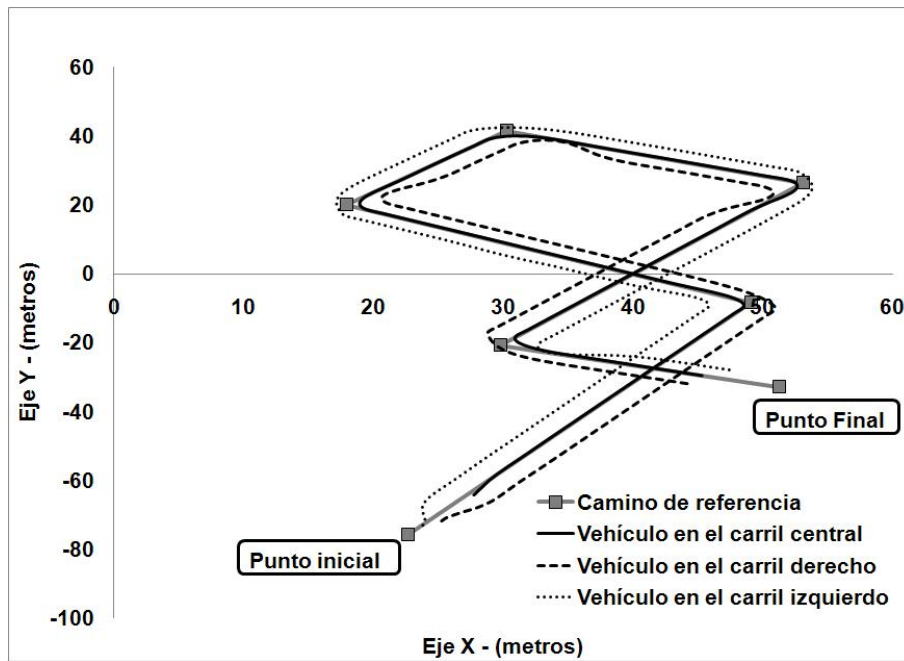


Figura 5.37: Cambios de carril utilizando el controlador proporcional multivariable

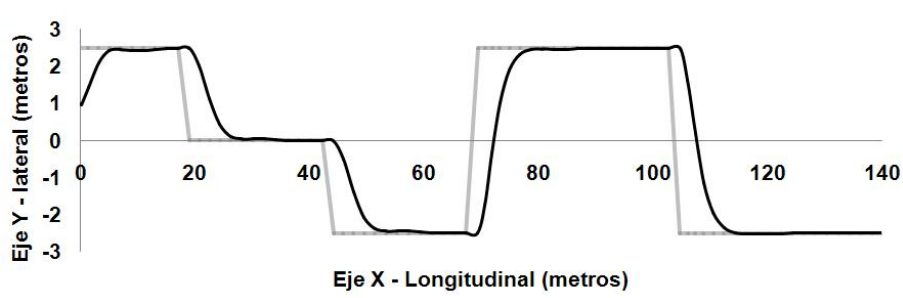


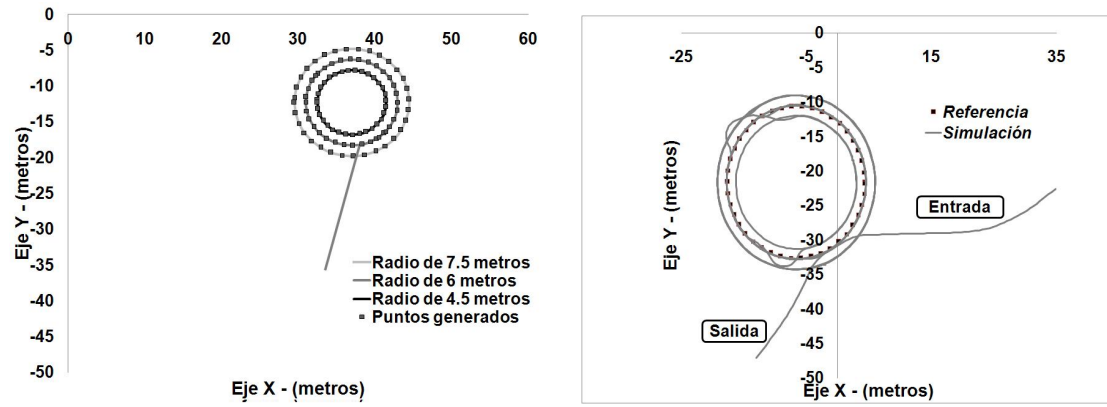
Figura 5.38: Cambios de carril en un segmento recto

En la figura 5.38 se observan varios cambios de carril en un segmento recto. Los cambios de consigna se han realizado a través de la interfaz hombre-máquina (módulo 3, figura 5.35), usando el nuevo sistema de referencia (módulo 5 de la misma figura). La respuesta del controlador no presenta sobrepicos y es rápida ante los cambios en la referencia.

5.5.4.2. Generación del mapa, giros y cambios de carril dentro de la rotonda

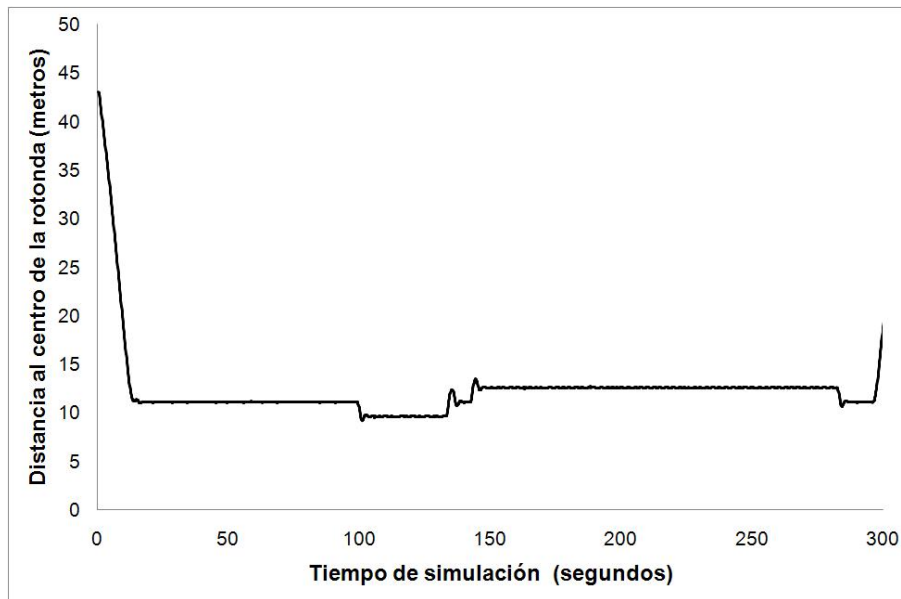
En la figura 5.39a se muestra la generación automática de trayectoria dentro de la rotonda. Se han utilizado tres radios diferentes: 4,5, 6 y 7,5 metros. La selección de tamaño de los radio se ha hecho considerando las condiciones de diseño. Cada punto es generado por el algoritmo y la línea recta es leída desde el planificador de ruta (módulo 4 y 5, figura 5.35). La generación de los puntos se realiza cada 0,2 radianes, para que puedan apreciarse los diferentes puntos. Aunque para mejorar la acción de control, ésta se puede aumentar.

Utilizando un radio de 11 metros, la figura 5.39b muestra el desempeño del vehículo autónomo. Se puede apreciar como el vehículo sigue el mapa generador por el módulo 6 de la figura 5.35, además utilizando la HMI se ha modificado la trayectoria y se han realizado



(a) Generación de puntos utilizando diferentes radios

(b) Cambios de carril



(c) Distancia al centro de la rotonda del experimento 5.39b

Figura 5.39: Simulaciones en la rotonda

diferentes cambios de carril dentro de la rotonda. Por otra parte, puede observarse como el vehículo entra y sale de la rotonda sin dificultad y manteniéndose siempre dentro del recorrido.

En la figura 5.39c se aprecia el comportamiento del vehículo en función de la distancia al centro de la rotonda. Se puede observar que existen pequeños sobrepicos cuando se le aplica un cambio de carril, sin embargo, éstos no son pronunciados y están por debajo de los 0,5 metros.

5.5.4.3. Simulaciones finales

Las últimas simulaciones se muestran en las figuras 5.40a y 5.40b. Se ha vuelto a utilizar el escenario con una rotonda de 11 metros de radio. En la primera puede observarse como el vehículo viene por un segmento recto. Éste tiene como salida la segunda, sin embargo el usuario ha decidido cambiar a la primera una vez que ya había pasado por ella, entonces el algoritmo redefine la ruta, y tras de dar una vuelta a la rotonda, el vehículo toma la

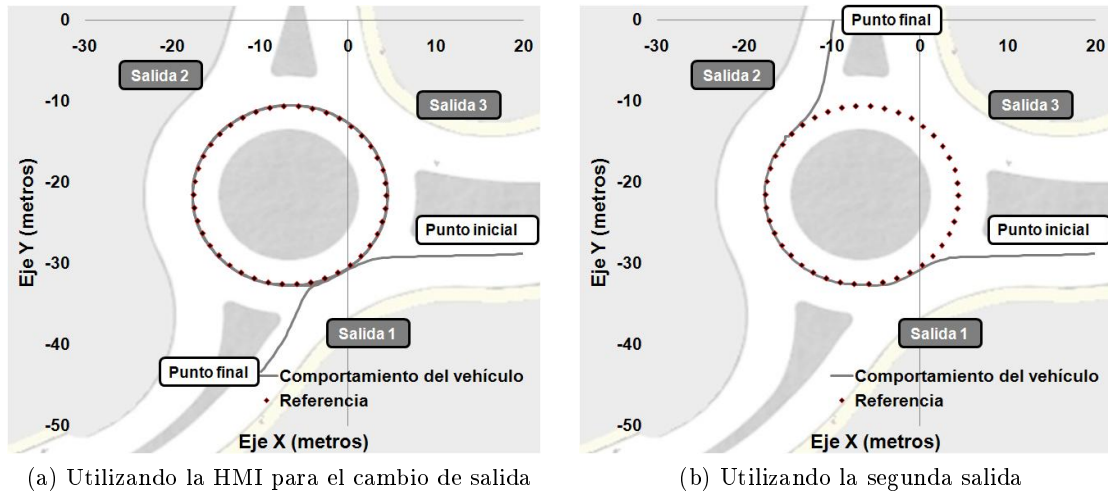


Figura 5.40: Maniobras circulando en la rotonda

nueva salida (Salida 1).

En la figura 5.40b se presenta el mismo escenario, pero esta vez el usuario no modifica el recorrido predefinido. Podemos observar como el vehículo toma la segunda salida exitosamente.

5.5.5. Pruebas en entornos reales



Figura 5.41: Rotonda en las instalaciones del CAR

Considerando las simulaciones presentadas en el apartado anterior como punto de partida, a continuación se presentan los primeros resultados con vehículos autónomos en rotondas reales.

El vehículo utilizado ha sido *Babioca*, una de las furgonetas del programa AUTOPÍA. Y se han utilizado los mismos módulos descritos en el esquema de control de la figura 5.35. Sin embargo, y tomando en cuenta la complejidad que presentan los vehículos reales, el controlador utilizado es un controlador borroso (no el controlador proporcional multi-

variable, 5.15) descrito en el capítulo 3. No obstante, las funciones de pertenencia han sido adaptadas a la nueva generación de trayectoria, así como la dinámica que presenta el vehículo circulando en la rotonda, utilizando diferentes velocidades y realizando cambios de carril.

5.5.5.1. Escenario de pruebas

Las instalaciones utilizadas para las pruebas presentadas en esta sección son las del CAR (sección 2.4). Recientemente, se ha construido una rotonda real (figura 5.41) con las siguientes especificaciones:

- El radio de la rotonda es de 13 metros.
- Cuenta con cuatro entradas o salidas, de 6 metros de ancho cada una.
- La rotonda cuenta con dos carriles internos de 3 metros cada uno.
- El sentido de circulación es el sentido anti-horario.

5.5.6. Control para el volante en la rotonda

Como sucede en la mayoría de las aplicaciones de la automática, las aplicaciones reales presentan un alto grado de dificultad, por ende, se requieren cuidadosas consideraciones para solucionar los problemas planteados. El caso de la conducción de vehículos autónomos en rotondas reales no es la excepción. Es por eso que en esta sección se desglosa el problema de control en tres partes: entrada, circulando y salida de la rotonda.

El diagrama de estados de la figura 5.42 muestra los diferentes controladores laterales usados en la conducción autónoma de vehículos en una rotonda. Éstos están activos desde que el vehículo detecta la entrada a una rotonda hasta que sale de ella. En esta tesis solo se plantea el problema del control lateral. El control longitudinal se presupone solucionado (capítulo 4), la velocidad de consigna puede variar durante la maniobra (módulo 3, figura 5.35), y aunque la velocidad de inicio está fijada en 6 km/h, ésta pueda variar según el experimento. Para la detección de la rotonda pueden utilizarse señales RFID, como se explicó en la sección 5.3, aunque en estos experimentos se ha utilizado la comunicación con una estación central propuesta en (Godoy et al., 2010), a través de la cual se conoce el radio y la posición del centro de la rotonda (Vlacic et al., 2011) para el cálculo de la trayectoria dentro de la misma.

En los experimentos se ha supuesto que la rotonda se puede detectar a 25 metros de distancia. Además, se ha utilizado un incremento del ángulo Δ (ecuación 5.13 y 5.14) de 0.05 radianes, para aumentar la precisión en el control. A continuación se explica cada una de las partes del control dentro de la rotonda.

5.5.6.1. Entrada a la rotonda

El control del vehículo en la *entrada a la rotonda* se ejecuta desde que el vehículo detecta una rotonda por delante, hasta que se encuentra en el carril central de la misma y paralelo a la tangente a la circunferencia en el punto de entrada.

En la figura 5.43 se ilustra el comportamiento del vehículo en esta etapa. Cuando el vehículo se va a incorporar a la rotonda se asume que el último tramo por el que circula es recto (camino de entrada, figura 5.43). Con esto se calcula el primer punto de intersección sobre la circunferencia (Punto **A**). Luego, con el valor del ángulo Δ y usando las ecuaciones

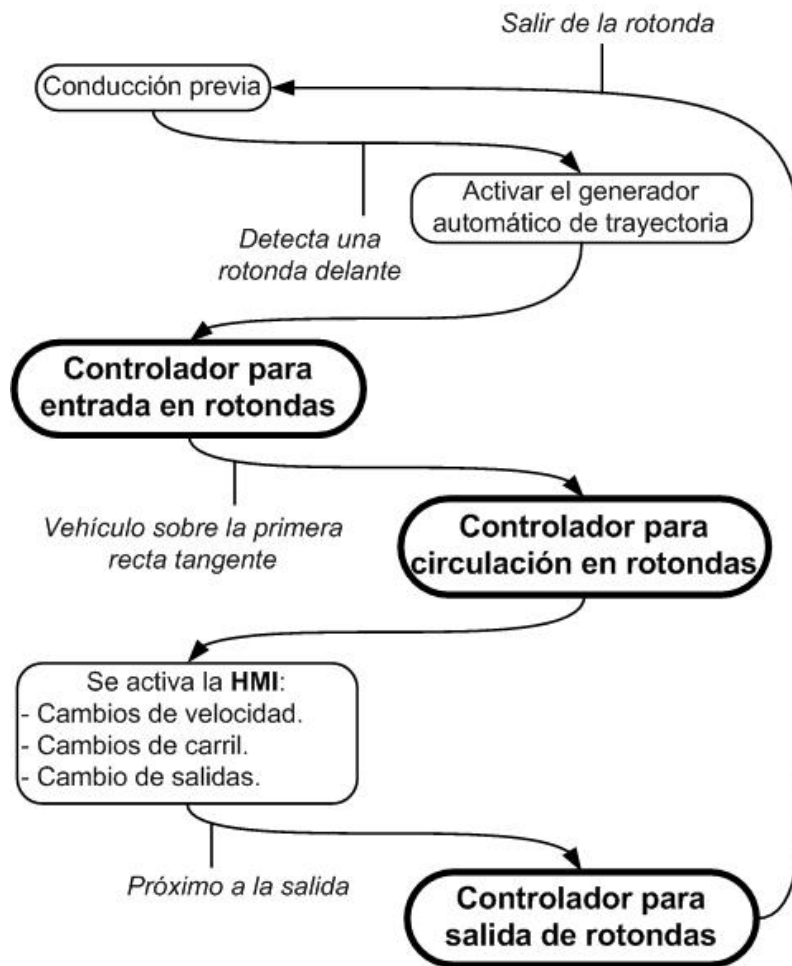


Figura 5.42: Diagrama de estado para la conducción autónoma de vehículos en rotondas reales

5.13 y 5.14, se calcula el siguiente punto de la trayectoria en la circunferencia (Punto **B**), y con éste el primer segmento recto que aproxima el arco de circunferencia sobre la rotonda (Línea 1). Este proceso se repite cada vez que el vehículo llegue al punto calculado (en este primer paso es el punto **B**), y mientras esté dentro de la rotonda.

Con cada punto de intersección sobre la circunferencia, se estiman las variables de posición para el control del volante. El controlador utilizado es el mismo que se describió en el capítulo 3 de la presente tesis.

5.5.6.2. Circulando en la rotonda

Una vez que el vehículo está dentro de la rotonda se activa el controlador de alto nivel, análogo al presentado en el capítulo 3. Las funciones de pertenencia, la base de reglas y las funciones de salida han sido adaptadas a este nuevo escenario de conducción. Sin embargo se ha mantenido el mismo control de bajo nivel, variables de entrada y de salida, así como la estructura del sistema de control propuesto. A continuación se describe el controlador borroso de un vehículo real, según el esquema de control para rotondas de la figura 5.35 (módulo 10).

La sintonización del controlador se ha realizado manualmente, considerando el com-

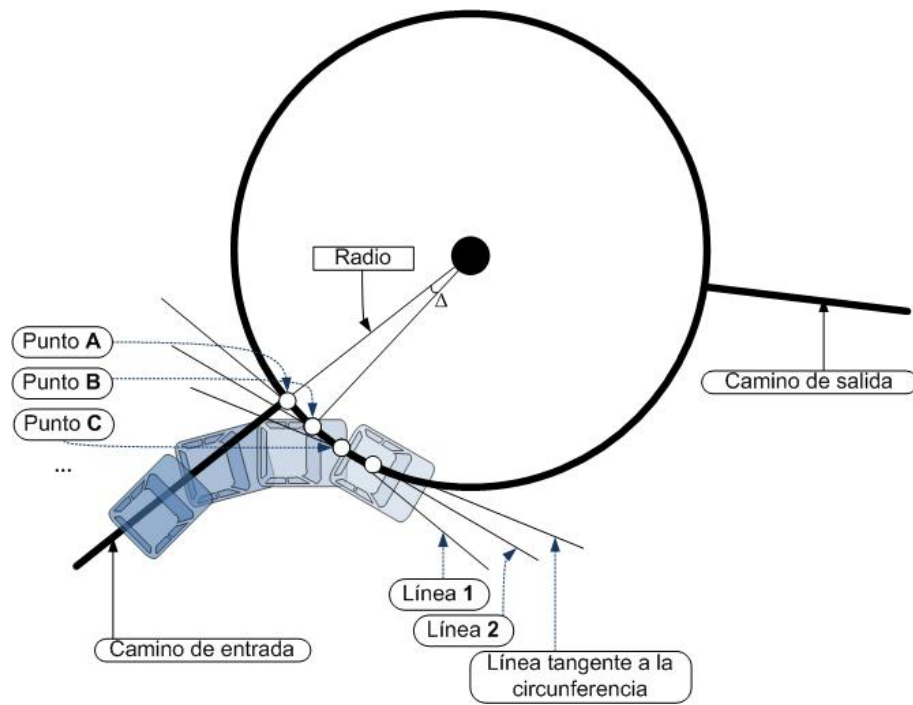


Figura 5.43: Comportamiento del sistema de control propuesto en la entrada de la rotonda

portamiento de conductores expertos en rotondas. En este sentido, se ha dado mayor peso a las reglas que ayuden a mantener el volante más girado a la izquierda (esto es válido para rotondas donde se circula en sentido anti-horario, como el caso que se estudia en este apartado). La figura 5.44 muestra las cuatro funciones de pertenencia correspondientes a cada una de las entradas: el *error angular*, el *error lateral*, la *distancia a la curva* y la *velocidad longitudinal* (figura 3.9). En líneas generales, se ha disminuido el rango de las entradas, en comparación con el controlador explicado en el capítulo 3 (figura 3.10), ya que la generación de trayectorias, a través de curvas paramétricas, se realiza a más frecuencia. A continuación se especifican los detalles relacionados con cada función de pertenencia de la figura 5.44.

- **Error angular:** se ha reducido a dos etiquetas cruzadas entre ellas (parte superior izquierda de la figura 5.44). La etiqueta central ha sido eliminada ya que introducía inestabilidad en el sistema cuando el ángulo, con la línea de referencia, era cercano a cero. Como se aprecia en el conjunto de reglas, su acción de control se usa más cuando se presentan cambios de carril dentro de la rotonda.
- **Error lateral:** se mantienen las tres etiquetas originales. Sin embargo, su rango de definición se ha reducido y trasladado a la derecha (el nuevo *Centro* está en 1.2 metros), como puede observarse en la etiqueta. Como se verá en las reglas más adelante, esto facilitará dar mayor peso al volante cuando el error angular está tendiendo a la derecha (ver última regla para el controlador de la posición).
- **Distancia a la curva:** se ha reducido a dos etiquetas cruzadas entre ellas (parte superior derecha de la figura 5.44). Además, se han mantenido los nombres originales, aunque para esta aplicación sea más conveniente llamarla distancia al siguiente punto del mapa (generado por el módulo 6, figura 5.35). No obstante, el rango de definición

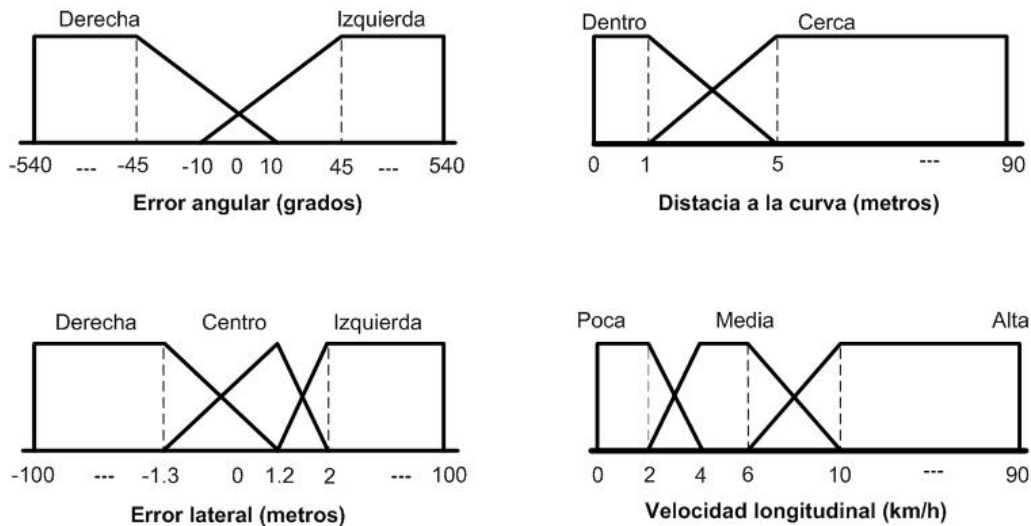


Figura 5.44: Funciones de pertenencia para el control lateral dentro de la rotonda

de esta función de pertenencia se ha visto reducido a menos de un metro (etiqueta *Dentro*) para la circulación en la rotonda (lo que supone una acción constante para ángulos Δ , según las ecuaciones paramétricas descritas anteriormente). Finalmente, la acción que proporciona a la velocidad angular sobre el volante es muy importante en los cambios de carril en la rotonda, ya que la etiqueta *Cerca* permite mayor movilidad en la dirección del vehículo en este sentido.

- **Velocidad longitudinal:** se mantienen las tres etiquetas originales. Sin embargo, el rango de definición ha sido reducido, en parte porque dentro de las rotondas no se circula a tanta velocidad, y en parte porque supone un problema de control adicional sintonizar el controlador en estas condiciones. En este sentido, y como se verá en los experimentos, éstos estarán limitados a 12 km/h (aunque las pruebas se han realizado a 15 y 20 km/h).

Como se ha mencionado antes, el cambio de carril requiere especial atención. El generador automático de trayectoria (módulo 6, figura 5.35) utiliza un nuevo radio (asociado al ancho del carril, tal como se explicó en la sección 5.5.3.2), y con éste crea los dos siguientes puntos de la trayectoria, haciendo que la recta tangente esté en la nueva circunferencia de referencia.

Debido a las consideraciones hechas en las funciones de pertenencia de entrada, el conjunto de reglas se ha reducido. A continuación se muestran las nuevas reglas del controlador de alto nivel para la posición:

SI *Error angular* Izquierda **ENTONCES** *Posición volante* Derecha

SI *Error angular* Derecha **ENTONCES** *Posición volante* Izquierda

SI *Error lateral* Izquierda **ENTONCES** *Posición volante* Derecha

SI *Error lateral* Derecha **ENTONCES** *Posición volante* Izquierda

SI *Error lateral* Centro **Y** *Error angular* Izquierda **ENTONCES** *Posición volante* Dermedia

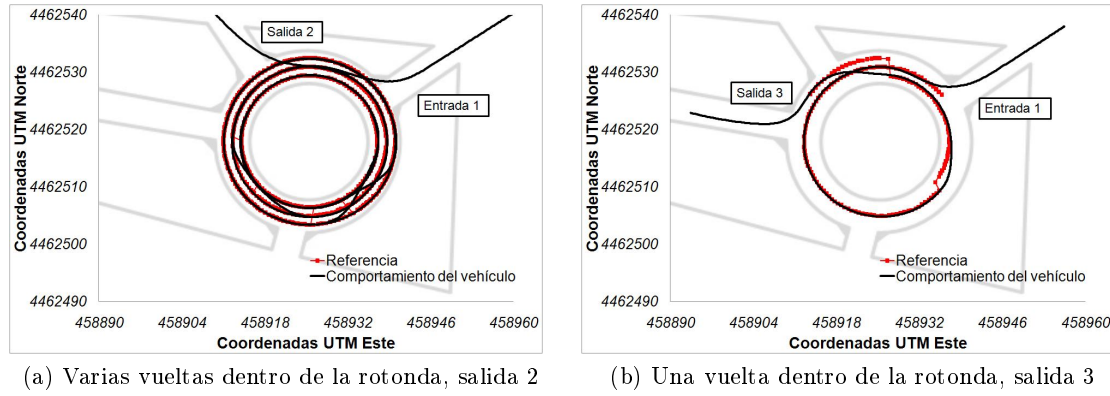


Figura 5.45: Cambios de carril en la rotonda

SI *Error lateral* Centro Y *Error angular* Derecha ENTONCES *Posición volante* Izqmedia

Las funciones de pertenencia han sido cruzadas cuando el *error lateral* es cero para ayudar a reducir la acción de control según los nuevos valores de salida: Izquierda (-1), Izqmedia (-0.5), Dermedia (+0.5) y Derecha (+1). A continuación, se muestran el conjunto de reglas para la otra salida del controlador, la velocidad angular:

SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. long.* Poca ENTONCES *Vel. angular* Poca

SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. long.* Media ENTONCES *Vel. angular* Media

SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. long.* Alta ENTONCES *Vel. angular* Media-Alta

SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. long.* Poca ENTONCES *Vel. angular* Media

SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. long.* Media ENTONCES *Vel. angular* Media-Alta

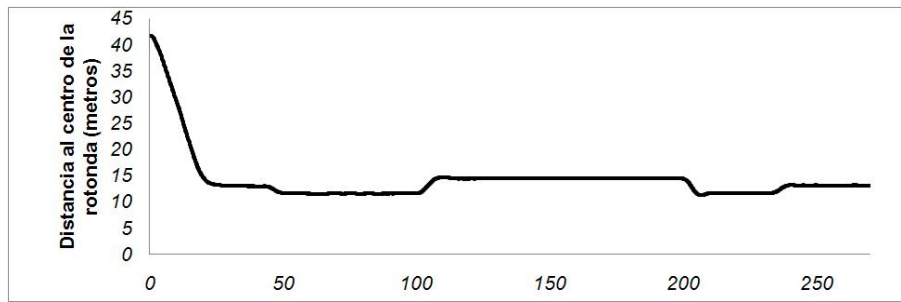
SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. real* Alta ENTONCES *Vel. angular* Alta

Donde las funciones singleton de salida son las mismas utilizadas en sección 3.5.2.3, esto es: Poca (0.4), Media (0.6), Media-Alta (0.8) y Alta (1)

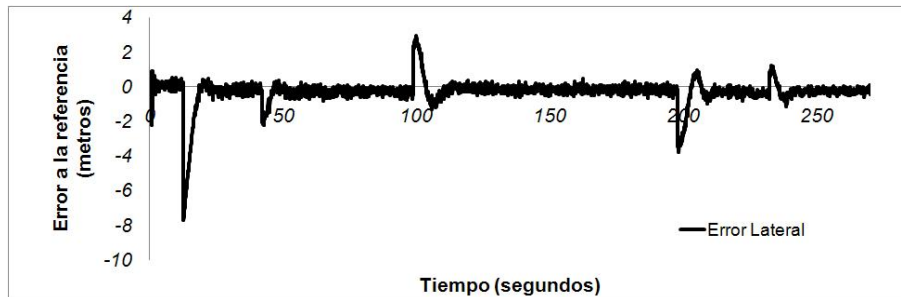
Para tomar la salida de la rotonda se han modificado las salidas del controlador para la circulación en la rotonda que se presentó en el apartado anterior, multiplicando el valor de la salida de la velocidad angular del controlador por un factor de 1,5 para aumentar la acción de control, y poder así girar el volante más rápido. En los experimentos que se describen a continuación, este controlador es activado desde la HMI del usuario. Una vez que el vehículo se encuentra fuera de rotonda, se anula el efecto de este controlador y se activa nuevamente el controlador.

5.5.7. Resultados experimentales en vehículos reales

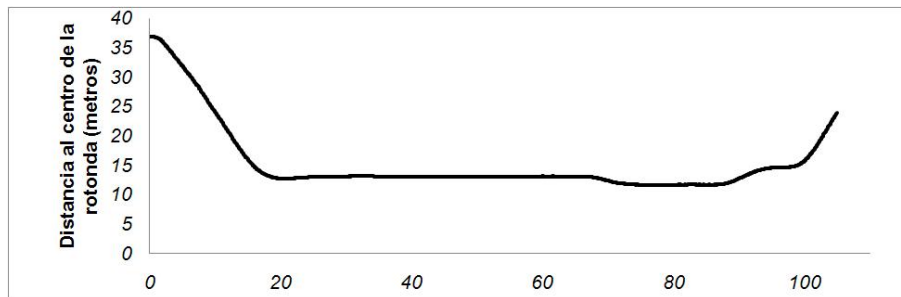
A continuación se presentan los resultados en vehículos reales, utilizando el controlador propuesto en los apartados anteriores. En los experimentos, el vehículo siempre entra por la entrada 1, y sale por las salidas 2 y 3 (figura 5.41). Se han realizado diferentes pruebas: cambios de carril, diferentes velocidades longitudinales, y entrada y salidas en la rotonda.



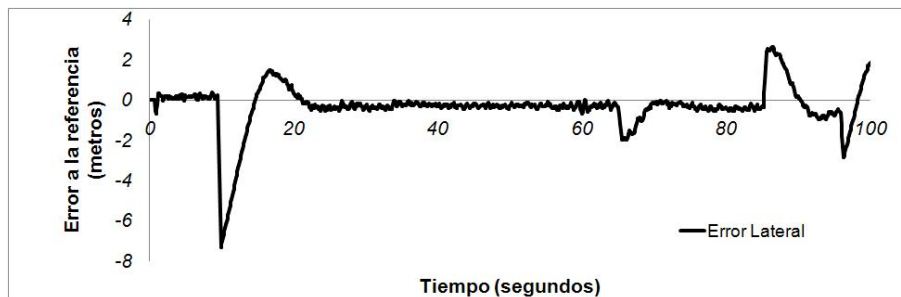
(a) Distancia al centro de la rotonda del experimento 5.45a



(b) Error lateral del experimento 5.45a



(c) Distancia al centro de la rotonda del experimento 5.45b



(d) Error lateral del experimento 5.45b

Figura 5.46: Comportamiento del vehículo en la rotonda en los experimentos 5.45a y 5.45b

5.5.7.1. Cambios de carril dentro de la rotonda

En la figura 5.45 se muestran dos experimentos de cambios de carril dentro de la rotonda. Las instrucciones de cambios de carril se realizan desde la interfaz HMI. En el primer experimento (5.45a) se observa como el vehículo se mantiene en todo momento sobre la referencia generada por el sistema de control (puntos rojos).

En la figura 5.46 se muestra el comportamiento del vehículo dentro de la rotonda para

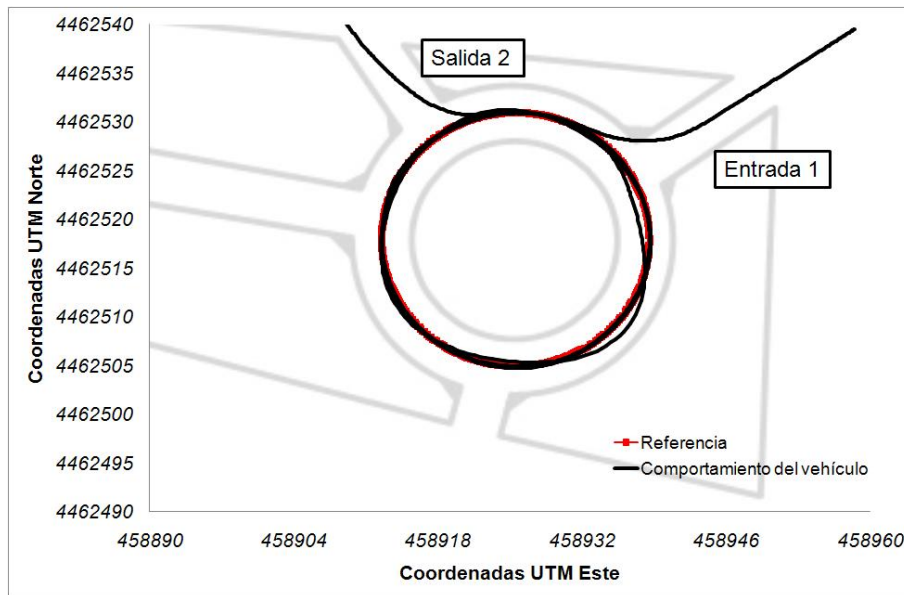


Figura 5.47: Comportamiento del sistema a diferentes velocidades, circulado por el carril central de la rotonda

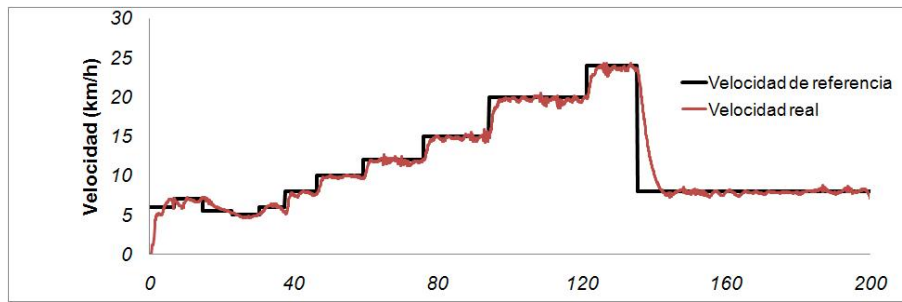
los dos experimentos presentados en la figura 5.45. La distancia del vehículo al centro de la rotonda se observa en la primera grafica (5.46a), y puede apreciarse que el sistema no presenta sobrepicos, incluso cuando se realizan cambios de carril desde el carril interno al externo. La segunda grafica (5.46b) muestra la evolución del error lateral en función del camino de referencia. Los saltos que se observan en esta gráfica representan los cambios de referencia dentro de la rotonda, así como la entrada y salida de la misma (figura 5.45). Al principio del experimento la velocidad longitudinal del vehículo es de 6 km/h, y se incrementa hasta los 15 km/h, donde el sistema aún se mantiene estable.

El segundo experimento (figura 5.45b) ilustra una situación en el que un vehículo que entra a la rotonda (entrada 1) y quiere salir por la salida 3 de la misma, pero ésta se encuentra obstruida o el conductor se ha pasado la salida, por lo que el vehículo da una vuelta más a la misma, por el carril interno. Una vez que se aproxima a la salida deseada, y ésta está libre, el vehículo vuelve al externo, y sale de la rotonda. Este experimento se ha realizado a una velocidad constante de 8 km/h. La información de los otros vehículos llega a través de red inalámbrica, según los trabajos realizados en (Godoy, 2011).

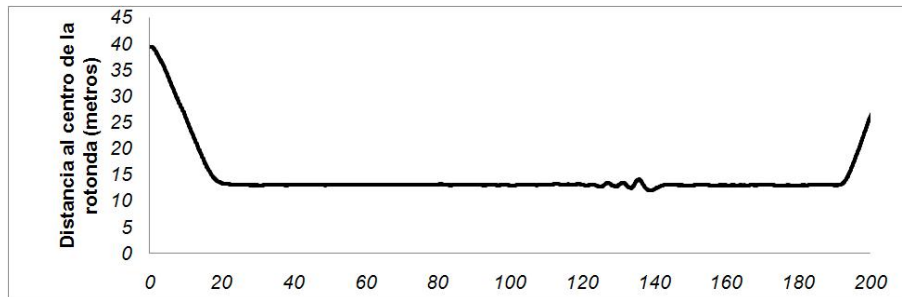
5.5.7.2. Diferentes velocidades

El objetivo de esta prueba es establecer el rango de estabilidad del controlador lateral para vehículos autónomos propuesto en esta tesis. Para ello se ha realizado un experimento a diferentes velocidades dentro de la rotonda, aunque las funciones de pertenencia están definidas hasta 10 km/h.

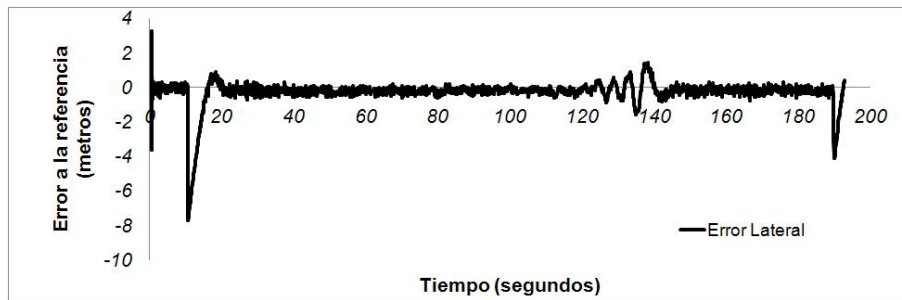
En la figura 5.47 se aprecia la posición, en coordenadas UTM, del vehículo dentro de la rotonda. En estas pruebas se ha utilizado el carril central de la rotonda, la trayectoria de referencia en una circunferencia de radio de 13 metros y se han dado tres vueltas dentro de la misma. Se observa que el vehículo entra y sale de rotonda siempre dentro del carril. Sin embargo, en algún momento se producen algunas oscilaciones debido al incremento de la velocidad.



(a) Variación de la velocidad utilizada en el experimento 5.47

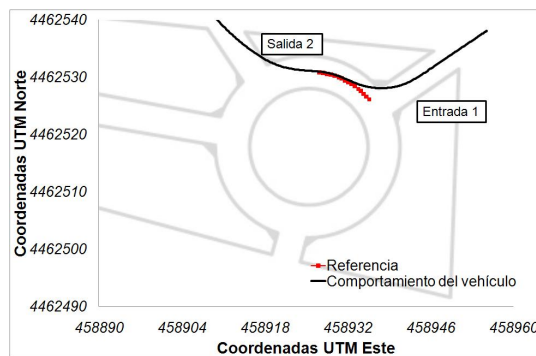


(b) Distancia al centro de la rotonda del experimento 5.47

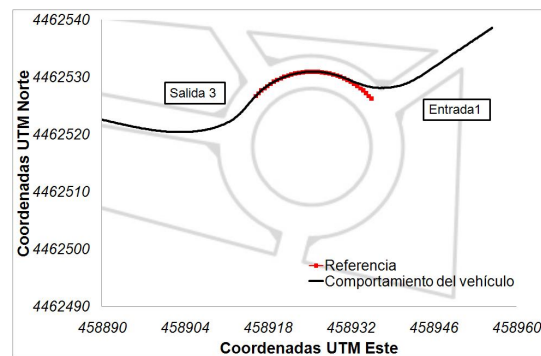


(c) Error lateral del experimento 5.47

Figura 5.48: Comportamiento del vehículo en la rotonda en el experimento 5.47



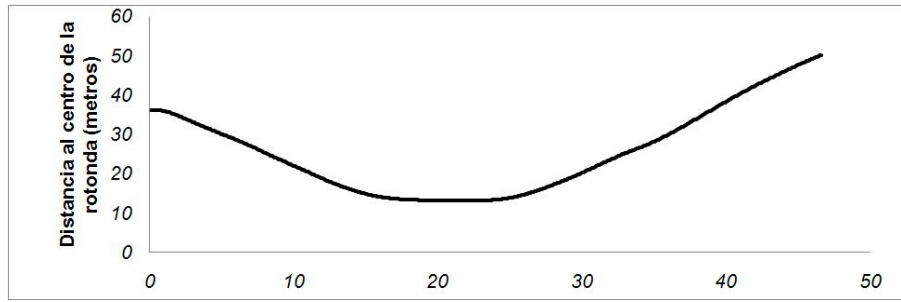
(a) Experimento tomando la salida 2



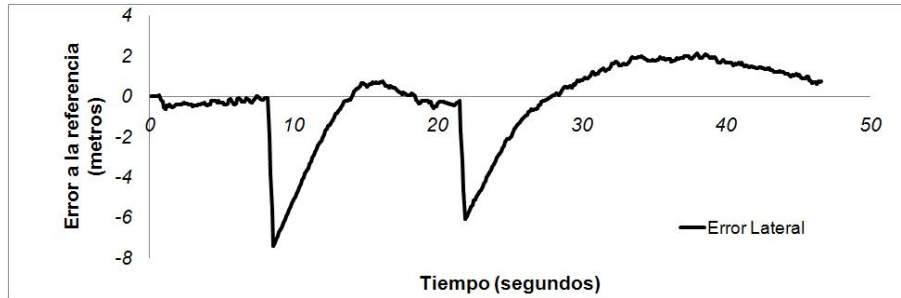
(b) Experimento tomando la salida 3

Figura 5.49: Casos reales con la salida 2 y 3

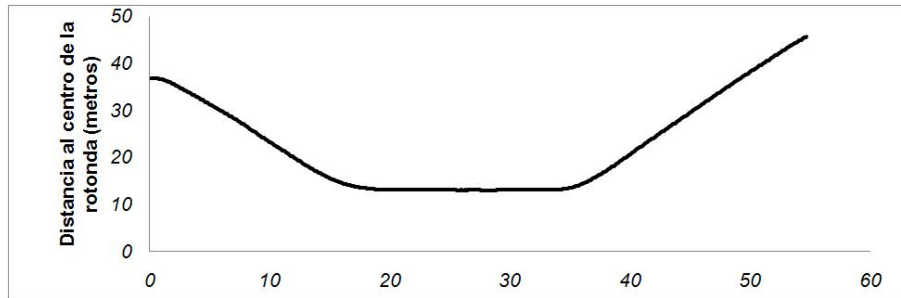
Las velocidades utilizadas de este experimento son desde los 5 km/h hasta los 24 km/h. En la figura 5.48a se observa la velocidad longitudinal (gráfica roja), leída desde un sen-



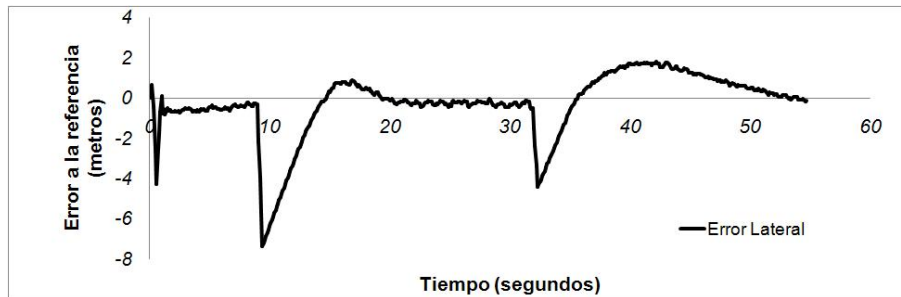
(a) Distancia al centro de la rotonda del experimento 5.49a



(b) Error lateral del experimento 5.49a



(c) Distancia al centro de la rotonda del experimento 5.49b



(d) Error lateral del experimento 5.49b

Figura 5.50: Comportamiento del vehículo dentro de la rotonda en los experimentos 5.49a y 5.49b

sor de efecto Hall en las ruedas delanteras del vehículo (sección 3.4.2), y la velocidad de referencia (gráfica negra). Podemos observar que, una vez que el vehículo está centrado en el carril de la rotonda, la velocidad aumenta hasta los 20 km/h sin presentar oscilaciones desestabilizadoras. Pero, a los 24 km/h, el sistema de control empieza a oscilar (ver figuras 5.48b y 5.48c alrededor de los segundos 120 y 140 del tiempo de ejecución). Se puede apreciar como el sistema de control vuelve a estabilizarse nuevamente, cuando se cambia

la consigna de velocidad a los 8 km/h y toma la salida 2 para salir de la rotonda.

5.5.7.3. Pruebas tomando las salidas 2 y 3

En la figura 5.49 se muestran los experimentos realizados para validar el funcionamiento, la robustez y estabilidad del sistema de control propuesto tomando las salidas 2 y 3 de la rotonda. Se han realizado a una velocidad constante de 8 y 10 km/h respectivamente. La señal que indica cuando debe tomarse la salida ha sido dada desde la interfaz HMI por el usuario.

Al igual que en los otros experimentos, el controlador dentro de la rotonda presenta un buen funcionamiento. Debido a que la señal de la salida está dado por el usuario, ésta no se realiza siempre en el mismo punto. Es por eso que en el segundo experimento (figura 5.49b) puede observarse que el controlador no sigue bien la calle de salida, aunque el vehículo no sale del carril. Como puede apreciarse en la grafica 5.50d, el error lateral va progresivamente tendiendo a cero, hasta que se activa nuevamente el controlador de conducción en entornos urbanos propuesto en el capítulo 3. El resto de gráficas de la figura 5.50 se muestra el comportamiento del sistema, así como ha sido explicado en los experimentos anteriores.

5.6. Conducción a altas velocidades

Hasta ahora, todas las aportaciones presentadas en esta tesis se han centrado en el control de vehículos autónomos en entornos urbanos. En los últimos años, los diferentes desarrollos que han presentado los sistemas ADAS, así como los avances en las comunicaciones inter-vehiculares, invitan a pensar que en el corto plazo, se pueda implementar la conducción autónoma de vehículos parcial o completa en autopistas. Por ese motivo, en esta sección se presenta una primera aproximación para el control lateral de vehículos en este tipo de escenarios. Para ello, se ha desarrollado un sistema de control de dirección para altas velocidades, un sistema cartográfico y un sistema de posicionamiento de alta precisión para guiar autónomamente uno de los vehículos de serie del programa AUTOPIA. El sistema ha sido probado en las pistas de pruebas privadas del Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA), con resultados muy prometedores.

5.6.1. Trabajos previos

Uno de los avances más representativos en el área de los ITS se ha visto reflejado en el último desafío propuesto por el departamento de defensa de los Estados Unidos, la competición más grande de vehículos autónomos en entornos urbanos: el *DARPA Urban Challenge*⁸. Recientemente, otros eventos internacionales se han desarrollado en Europa. Dos claros ejemplos son: el GCDC (Kwakkernaat, 2011) (en la siguiente sección se explicará detalladamente la participación del grupo AUTOPÍA en la edición de 2011), y el experimento del grupo *Vislab*, de la universidad de Parma (Broggi et al., 2010), donde un vehículo eléctrico ha sido capaz de hacer la travesía desde Italia hasta China de forma autónoma la mayor parte del recorrido. Estos resultados son prometedores, aunque queda algún tiempo para que podamos ver vehículos completamente autónomos en las autopistas.

Muchos de los trabajos realizados por diferentes grupos de investigación y fabricantes, relacionados con las comunicaciones vehículo a vehículo -V2V-, son de vital importancia. El protocolo IEEE 802.11p en la banda de 5.9GHz es el primero específico para comunicación

⁸<http://www.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>

inter vehicular. Prueba de la gran importancia de las comunicaciones V2V en la actualidad es el consorcio Car2Car, el cual ha tenido gran aceptación por parte de fabricantes, investigadores e incluso entes gubernamentales ⁹.

Otra tarea de vital interés en este tipo de escenarios son los sistemas de posicionamiento fiables, capaces de situar vehículos sobre las carreteras con un alto nivel de precisión, para realizar una conducción autónoma en escenarios reales. Algunas soluciones se basan en la fusión sensorial de los sistemas de posicionamiento global (GPS) con sensores a bordo, así como: IMU (Toledo-Moreo y Zamora-Izquierdo, 2009), láseres (Gao y Coifman, 2006), cámaras (Meguro et al., 2009), entre otros. Diferentes grupos de investigación han desarrollado estos sistemas, e incluso algunos ya han sido comercializados. Sin embargo, su desarrollo sigue siendo muy prematuro para una implementación en escenarios reales. Teniendo esto en mente, una de las soluciones es el uso de carriles dedicados para los vehículos autónomos, aunque esto supone una inversión considerable en infraestructura.

Algunos fabricantes han centrado sus esfuerzos en sistemas de ayuda a la conducción -ADAS- para autopistas, como el control de crucero -CC- y el control de crucero adaptativo -ACC-, que hacen la conducción autovías más comfortable. Sin embargo, mientras estos controles longitudinales han sido implementados en vehículos de serie, el control lateral sigue siendo un problema abierto para la investigación.

Como se mencionó en el capítulo 3 de esta tesis, hasta ahora, nuestro esquema de control lateral en entornos urbanos utiliza una cartografía digital predefinida (Pérez et al., 2011d). Este sistema es válido cuando la ruta definida utiliza un mapa digital preciso. Además, dentro de entornos urbanos, pueden definirse rutas alternativas, así como en el movimiento de marcha atrás (sección 5.4) y en autovías, debido a obras públicas o mantenimiento de las carreteras.

El enfoque presentado en esta tesis, para solucionar el problema de la conducción de vehículos autónomos en autovías, está basado en un vehículo líder que cuenta con un sistema de posicionamiento de alta precisión, y que a su vez es capaz de generar en tiempo real mapas digitales para un vehículo que viene detrás equipado con un sistema de guiado automático. En esta sección se propone la solución a dos problemas: el de generación de trayectoria, utilizando un sistema de generación de mapas digitales, y el de control, basado en un controlador de lógica borrosa capaz de seguir esta referencia y mantener a un vehículo autónomo dentro del carril.

A continuación se explicarán los medios utilizados para ello. Más adelante, se especifican las aportaciones hechas por el sistema de control propuesto, esto es: la cartografía digital utilizada, el sistema de posicionamiento y el controlador lateral propuesto para altas velocidades, basado en la arquitectura de control descrita en el capítulo 3 de esta tesis. Finalmente se explicarán los experimentos llevados a cabo para la validación del sistema propuesto.

5.6.2. Plataforma y escenario de pruebas

El sistema de control desarrollado se ha implementado sobre uno de los vehículos de la flota del programa AUTOPÍA, concretamente un Citroën C3 descapotable (*Clavileño*). Como vehículo líder y generador de la trayectoria de referencia, se ha utilizado a *Platero*. Los vehículos eléctricos fueron descartados porque no pueden circular a más de 80 km/h. En la figura 5.51 se muestra la descripción de los dispositivos a bordo y la distribución de los vehículos para las pruebas descritas en esta sección.

La instrumentación necesaria para el guiado de un vehículo autónomo incluye: un PC

⁹<http://www.car-to-car.org/>

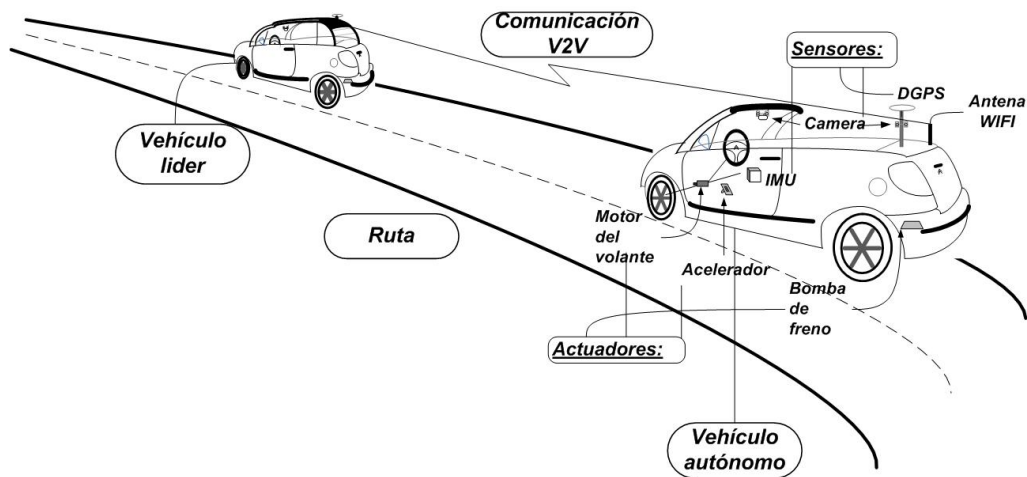


Figura 5.51: Distribución de vehículos en experimentos a alta velocidad. Sensores y actuadores a bordo del vehículo autónomo

embarcado que aloja el software de control, un sistema de posicionamiento global con corrección diferencial, una unidad de medida inercial como principales entradas sensoriales para llevar a cabo el posicionamiento y posterior guiado del vehículo; una red inalámbrica LAN para recibir la información de los vehículos del entorno y una tarjeta de entradas/salidas digitales encargada de enviar las señales de control generadas al volante y el acelerador. El sistema de guiado también utiliza la información que circula por el bus CAN del vehículo. Por último, el vehículo cuenta con un sistema electro-hidráulico de frenado, el cual se ha descrito en la sección 4.4, y con más detalle en (Milanés et al., 2010b).

Las pistas de pruebas utilizadas para los experimentos fueron facilitadas por el Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA), en su sede de Torrejón de Ardoz (Madrid). Por motivos de confidencialidad no podemos utilizar ninguna imagen del mapa o de las instalaciones usadas en esta tesis.

5.6.3. Sistema de control

El sistema de control debe cumplir dos objetivos específicos: generar la trayectoria y seguirla con el menor error posible. En esta sección se propone un sistema de control que se divide en tres partes. En primer lugar la *cartografía digital* que nos permite conocer con precisión la ruta que queremos seguir para, posteriormente, mediante un *sistema de posicionamiento* absoluto poder referenciar el coche respecto a ese mapa digital. Finalmente, un *controlador* basado en lógica borrosa que se encarga de generar las consignas de giro al volante del vehículo autónomo.

5.6.3.1. Cartografía digital

Actualmente existen mapas digitales de las carreteras, así como la línea de referencia central de los carriles (Bétaille y Toledo-Moreo, 2010). Siguiendo esta idea, el objetivo buscado en esta tesis para la solución del problema planteado en autovías reales, es generar un mapa que pueda indicar al vehículo la trayectoria a seguir. Una desventaja de los mapas predefinidos es que necesitan constantes actualizaciones, y además no consideran imprevistos, así como accidentes, caminos bloqueados por nieve o lluvias, entre otros. Es por ello que se propone una generación del mapa digital en tiempo real, utilizando la

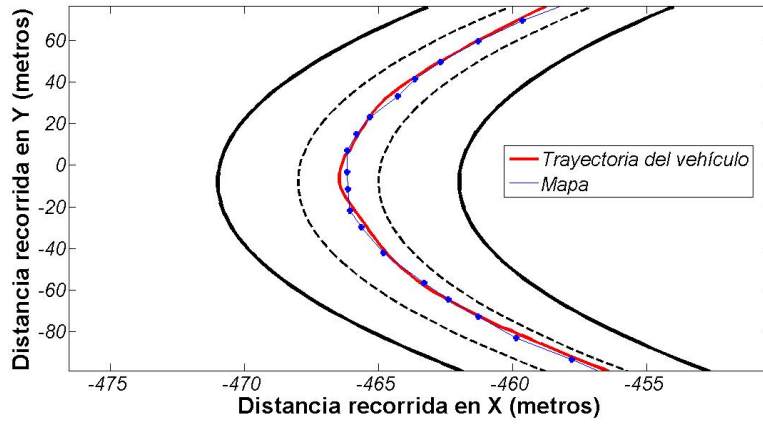


Figura 5.52: Detalle de un recorrido con las líneas de referencia de los carriles y el recorrido realizado por el vehículo

información en coordenadas UTM (*Universal Transversal Mercator*) de un vehículo líder conducido manualmente. A continuación se explican las consideraciones para la generación de los puntos del mapa y los segmentos de recta:

- **Distancia mínima entre puntos** (d_{min}): se obtiene a través de la suma de los máximos errores permitidos por el sistema de posicionamiento de ambos vehículos. La desviación máxima permitida se calcula con dos puntos consecutivos, considerando las distancias inferiores a 1 metro despreciables.
- **Distancia máxima entre puntos** (d_{max}): se define en 10 metros para evitar segmentos de referencia de gran longitud que podrían provocar la salida del carril del vehículo autónomo.
- **Velocidad mínima** (v_{min}): está definida en 0 km/h.
- **Velocidad máxima** (v_{max}): está definida en 110 km/h para autovías, siguiendo el código de circulación de España ¹⁰.

Considerando d la separación real entre puntos consecutivos del mapa digital y v la velocidad longitudinal del vehículo, la distancia real entre dos puntos consecutivos está determinada por las siguientes ecuaciones:

$$d = d_{min} \quad \text{Si } v = v_{min} \quad (5.16)$$

$$d = d_{min} + \frac{d_{max} - d_{min}}{v_{max} - v_{min}}(v - v_{min}) \quad \text{Si } v_{min} > v > v_{max} \quad (5.17)$$

$$d = d_{max} \quad \text{Si } v \geq v_{max} \quad (5.18)$$

En la figura 5.52 se muestra un ejemplo del sistema desarrollado. La gráfica muestra, en coordenadas cartesianas, una autopista convencional con tres carriles de circulación en el mismo sentido. En dicha carretera, se muestra la cartografía digital, esto es, el mapa generado dinámicamente con el vehículo líder (marcas azules) y el recorrido realizado posteriormente por el vehículo autónomo (línea roja). La velocidad máxima en este experimento

¹⁰En el momento en se realizaron los experimentos, ya que ahora ha vuelto a cambiar a 120 km/h.

llego a ser de 70 km/h. Hay que destacar que cuando los puntos se encuentran dentro de la distancia mínima (cuando la coordenada Y está cerca de cero, en la figura 5.52), éstos se consideran un único segmento recto. Con esa cartografía, podemos determinar los errores (lateral y angular) del vehículo respecto a esa referencia para posteriormente realizar el ajuste del controlador.

5.6.3.2. Sistema de posicionamiento

Para poder calcular los errores se necesita contar con un sistema de posicionamiento preciso. Dentro del grupo AUTOPIA, se ha utilizado en los últimos años un sistema de posicionamiento global con corrección diferencial que permite conocer la posición del vehículo en coordenadas UTM, ayudado por una unidad de medida inercial que, junto a la odometría del vehículo proporcionada por el bus CAN, permite conocer la posición del vehículo en caso de fallos del sistema de posicionamiento global, debido al paso por túneles o zonas donde la recepción de satélites sea baja (Milanés et al., 2008).

Sin embargo, la precisión depende en gran medida de la proximidad a la estación base y de los fallos que se generan a través de la red inalámbrica. Este sistema es solo válido para entornos urbanos, donde la proximidad a la estación base se mantiene. Es por ello que en esta implementación se ha utilizado un sistema de posicionamiento basado en el sistema europeo de navegación por satélite EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay System*), que incrementará la seguridad, el control y la sostenibilidad de la señal GPS. Ya que los dos vehículos llevan los mismos dispositivos, los errores de posicionamiento en ambos vehículos son análogos y las medidas permiten mantener el vehículo dentro del carril.

El error máximo de posicionamiento de este sistema es de 50cm respecto a la posición real del vehículo. Teniendo en cuenta las longitudes de un vehículo y que las autopistas tienen un mínimo de 3m de ancho de carril, este nivel de precisión cumple con los requisitos para llevar a cabo un control preciso que permita mantener el vehículo dentro de los límites del carril.

5.6.3.3. Controlador lateral para alta velocidad

El controlador borroso propuesto en esta sección utiliza las mismas variables de entrada para el control de posición, esto es: el error lateral y angular respecto de la línea de referencia. Debido a los requerimientos del diseño del bajo nivel del vehículo solo se han ajustado los parámetros de control para la posición del volante. Las funciones de pertenencia del controlador, juntos con los valores singleton de salida, se muestran en la figura 5.53. Estas funciones han sido estrechadas, en comparación con las utilizadas en el capítulo 3, para acotar el rango de acción de las variables controladas, tal como un conductor humano gira el volante en las autovías. Por ejemplo, las etiquetas del $Medio_{Der}$ y $Medio_{Izq}$ cierran el rango de acción del error angular cuando el vehículo está sobre la línea de referencia. Las nuevas etiquetas de salida: Der_{Med} y Izq_{Med} limitan la acción del volante a la mitad, contribuyendo a la estabilidad del sistema a éstas velocidades.

Las reglas utilizadas para el control de posición del volante se mencionan a continuación:

SI *Error lateral Izquierda* **ENTONCES** *Posición volante Derecha*

SI *Error lateral Medio_{Izq}* **ENTONCES** *Posición volante Der_{Med}*

SI *Error lateral Medio_{Der}* **ENTONCES** *Posición volante Izq_{Med}*

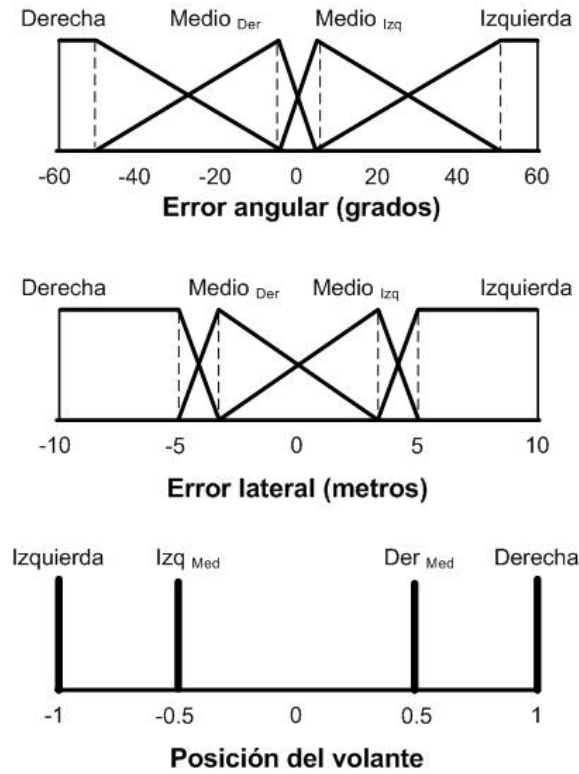


Figura 5.53: Funciones de pertenencia para altas velocidades: error angular, error lateral y salidas del controlador borroso

- SI *Error lateral Derecha* ENTONCES *Posición volante Izquierda*
 SI *Error angular Izquierda* ENTONCES *Posición volante Derecha*
 SI *Error angular MedioIzq* ENTONCES *Posición volante DerMed*
 SI *Error angular MedioDer* ENTONCES *Posición volante IzqMed*
 SI *Error angular Derecha* ENTONCES *Posición volante Izquierda*

La sintonización y ajuste del controlador se realizaron durante las pruebas en las pistas del INTA. Los valores utilizados para codificar los triángulos y trapecios de la figura 5.53 se calcularon después de varias pruebas conduciendo el vehículo en modo manual. Los valores finales del controlador han sido restringidos para evitar saltos en la acción de control.

5.6.4. Experimentos

A continuación se describen los experimentos realizados en las pistas de pruebas del INTA. El radio de curvatura de la pista es de 500 metros, y el rango de velocidades utilizadas en estos experimentos va desde los 40 hasta los 110 km/h. Las pruebas se han clasificado en seguimiento del líder y cambios de carril a altas velocidades.

5.6.4.1. Seguimiento del líder

En la figura 5.54 se muestra la evolución de primer experimento llevado a cabo, utilizando un vehículo autónomo a altas velocidades. El sentido de los recorridos es el contrario

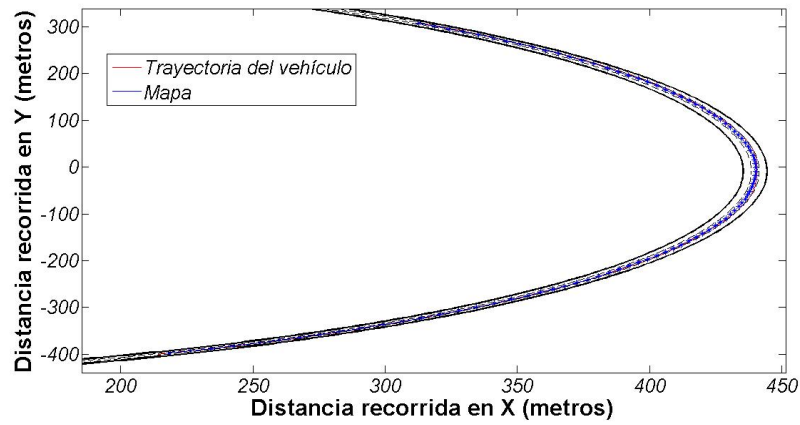


Figura 5.54: Experimento 1, conducción autónoma del volante con velocidades comprendidas entre 80 y 110 km/h

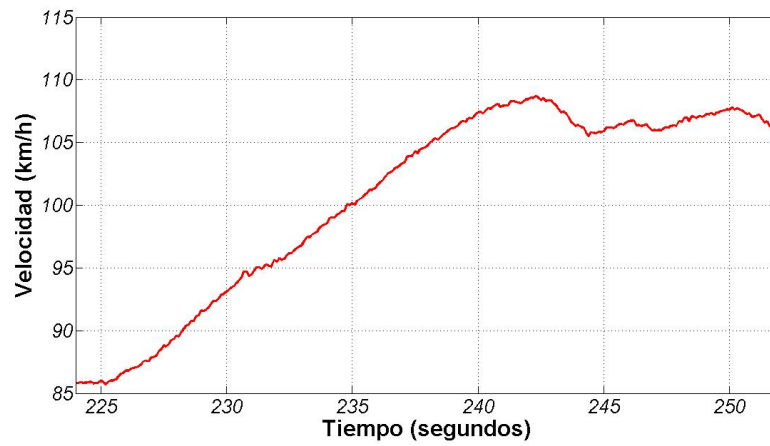


Figura 5.55: Velocidad del vehículo con dirección autónoma, experimento 1

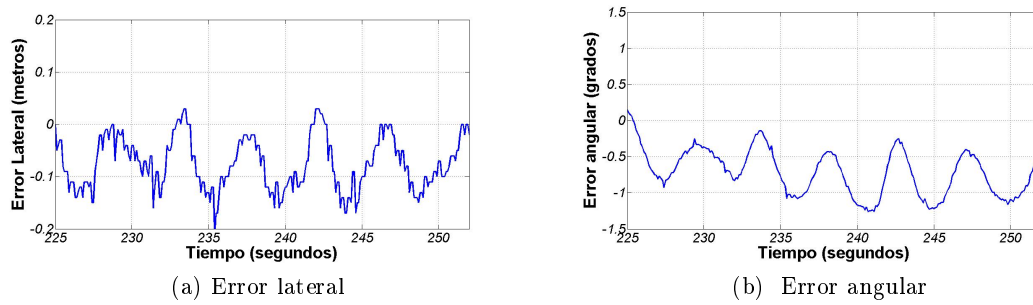


Figura 5.56: Variables de control para la dirección del volante a altas velocidades, experimento 1

a las agujas del reloj. En la grafica podemos observar como el vehículo se mantiene en todo momento dentro del carril central.

Las velocidades alcanzadas se muestran en la figura 5.55. Podemos observar la velocidad

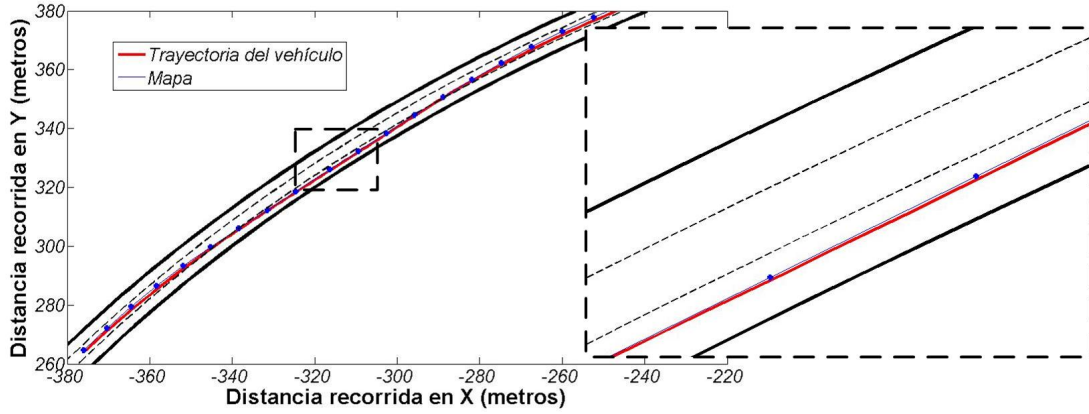


Figura 5.57: Experimento 2, cambio de carril a 90 km/h

del vehículo va desde los 85 km/h a los 109 km/h, siguiendo al vehículo líder sin salirse del carril.

Finalmente, en la figura 5.56 se observan los errores lateral y angular durante la prueba. Éstos son en todo momento negativos, debido a que el vehículo está girando en sentido anti horario. Aunque se observan algunas oscilaciones, éstas son muy pequeñas, por debajo de 10 centímetros y un grado, respectivamente. Estas oscilaciones se deben a la inmediatez con que se lee el mapa generado por el vehículo líder, aunque son imperceptibles en la conducción, tal como se observa en los videos publicados en la web del grupo ¹¹.



Figura 5.58: Velocidad del vehículo con dirección autónoma en el experimento 2, cambio de carril

5.6.4.2. Cambios de carril

Una de las maniobras más utilizadas, y peligrosas, en las autovías son los cambios de carril, ya que son la base de los adelantamientos (sección 5.2). En esta sección se muestra lo bien que se comportó nuestro sistema de control de dirección para altas velocidades, al

¹¹<http://www.iai.csic.es/users/autopia/Videos/INTATests.wmv>

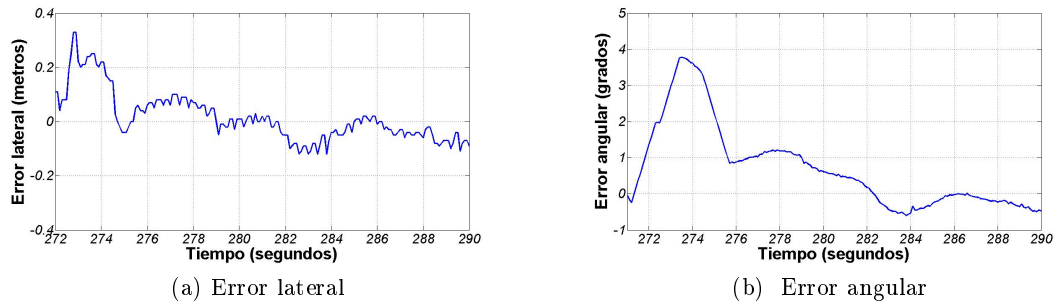


Figura 5.59: Variables de control experimento 2, cambio de carril

realizar cambios de carril.

La figura 5.57 muestra el vehículo circulando en el carril central y en un cambio de carril a la izquierda. El mapa digital generado por el vehículo líder envía el cambio en la referencia (grafica azul). Luego, el vehículo en modo autónomo es capaz de seguir por el carril izquierdo. En la figura 5.58 se observa que la velocidad a la que se produce éste es de 90 km/h.

Al principio de la figura 5.59a se observa cómo cambia la referencia del error lateral (segundo 273), y luego como el controlador se estabiliza alrededor de los valores que se apreciaron en el primer experimento. La figura 5.59b muestra como la dirección del vehículo evoluciona en esta maniobra, logrando también estabilizarse en los valores ligeramente negativos, que se observaron en la figura 5.56b.

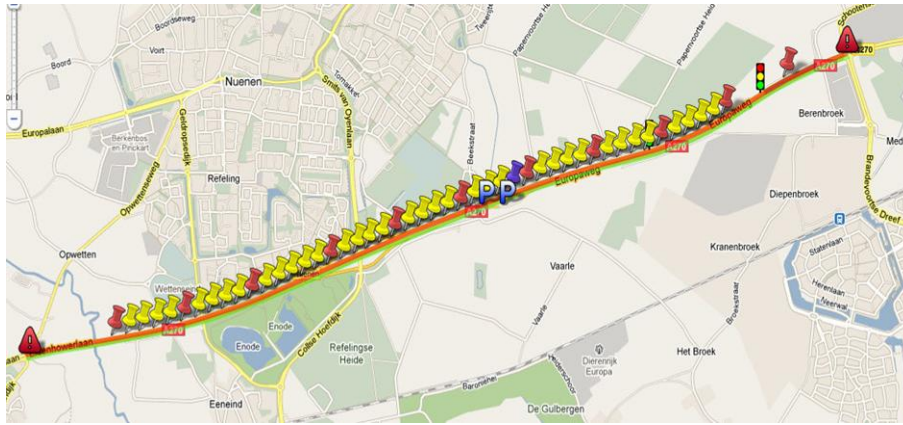
5.7. Participación en el GCDC 2011

A lo largo de esta tesis se ha explicado la evolución que han tenido los sistemas inteligentes de transporte -ITS- en la última década. En la sección anterior se describieron las primeras pruebas para la conducción autónoma de vehículos en autovías, aunque solo se consideró el control lateral, por lo que en esta sección se explica el control longitudinal de un vehículo a gasolina.

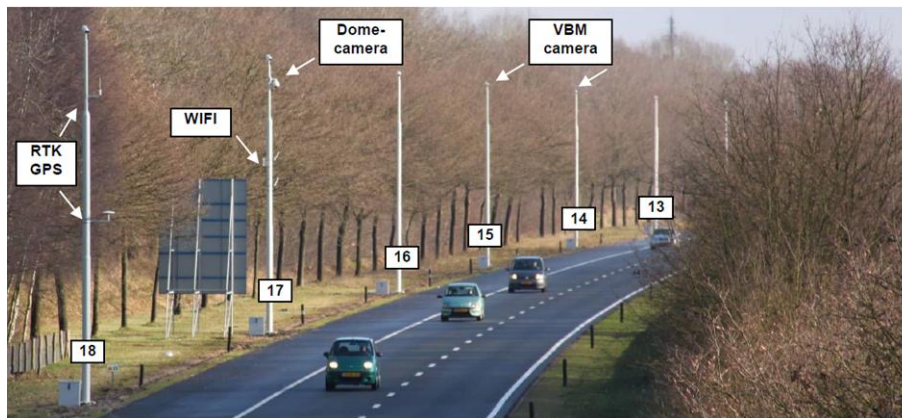
Como se mencionó en el capítulo 2, algunos proyectos desarrollan nuevas tecnologías de comunicación, control, y sistemas aplicados en autovías. Del mismo modo, se ha mencionado la mayor competición para vehículos autónomos, el reto DARPA. En mayo del año 2011 tuvo lugar la primera competición Europea para vehículos autónomos, el GCDC (*Grand Gooperative Driving Challenge*) en Helmond, Holanda. El programa AUTOPÍA logró participar en este evento, utilizando los algoritmos de control que, hasta ahora, sólo habían sido probados a bajas velocidades y circuitos de pruebas privados. Las últimas aportaciones descritas en esta tesis son los resultados, controladores y experiencias conseguidas por el programa AUTOPÍA en el GCDC.

5.7.1. El reto de participar en el GCDC 2011

El primer reto de conducción autónoma cooperativa que se haya desarrollado en Europa, y conocido por sus siglas en ingles: GCDC 2011, es una competición abierta para grupos pioneros en los temas relacionados con la cooperación entre vehículos autónomos. Los equipos participantes han tenido que desarrollar diferentes estrategias de control, para guiar longitudinalmente a su vehículo experimental dentro de un pelotón que circula en



(a) Localización de las cámaras, RSU y puntos de salida y llegada del GCDC 2011 (fuente: <http://maps.google.nl>, (Kwakkernaat, 2011))



(b) Imagen con los postes, cámaras, RSU, antenas y GPS RTK junto a la autopista (Kwakkernaat, 2011)

Figura 5.60: Autovía A270 entre Helmond y Eindhoven, Holanda

una autopista. Los vehículos intercambian información a través de una red inalámbrica. La idea de los sistemas de control es mantener una distancia mínima de seguridad con el vehículo precedente. El control del volante no está contemplado en esta primera edición, éste debe ser llevado por un conductor humano.

En contraste con algunas demostraciones de seguimiento de pelotones, utilizando comunicación vehículo a vehículo (V2V), que se han realizado antes, v.g. el proyecto SPITS ¹²), el GCDC es la primera que utiliza una flota de vehículos heterogéneos, desde un pequeño *Smart* hasta grandes camiones. Además, los dispositivos utilizados para las comunicaciones, así como los controladores, los sensores a bordo de vehículos y los actuadores sobre los pedales, son diferentes entre un equipo y otro, haciendo que se asemeje más a un futuro escenario de tráfico real.

La competición se celebró en la autopista holandesa A270, entre la ciudad de Helmond y Eindhoven, la cual estuvo cerrada al tráfico durante el fin de semana del evento (el 14 y 15 de mayo de 2011). La figura 5.60 muestra la posición de las unidades al lado de la vía, encargadas de monitorizar en todo momento a los vehículos. Éstas transmitían información a todos los vehículos y recibían de éstos sus datos, que luego los otros equipos podían utilizar para verificar la información recibida. El recorrido Helmond-Eindhoven se

¹²<https://spits-project.com/>

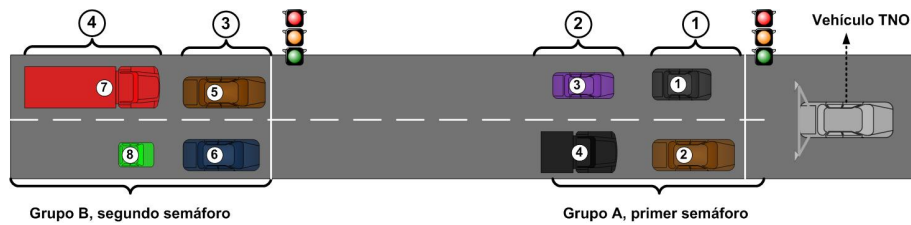


Figura 5.61: Posición de salida de los vehículos en cada prueba de clasificación del GCDC 2011

usó para la competición mientras que el Eindhoven-Helmond fue empleado para retornar a la posición inicial después de cada prueba de clasificación.

El tramo utilizado es de unos 6 km de longitud. El área de circulación es plana, y cuenta con un cruce con semáforos. En la figura 5.60a se muestra el mapa del circuito, donde el principio y fin de la trayectoria se señala con una señal de triangular. Los puntos amarillos indican los puntos con cámaras, mientras que los rojos indican los puntos de la infraestructura con comunicaciones inalámbricas (RSU). El punto morado indica la estación con corrección diferencial RTK, para los equipos que desearan utilizarla.

En la figura 5.61 se muestra la disposición de los vehículos en la salida de cada prueba de clasificación. Una vez que el semáforo del segundo grupo cambie a verde, los pelotones de ambos carriles se moverán hasta el primer semáforo, y cuando éste cambie a verde, empezará la prueba en autovía. Un vehículo de la organización sirve como líder de ambos pelotones (vehículo TNO, figura 5.61). Éste define el perfil de velocidad de la competición, acelerando y frenando aperiódicamente, para verificar el efecto acordeón que produce cada uno de los participantes en los pelotones. Los criterios para la puntuación de cada equipo se centran en el comportamiento colectivo e individual. Quien obtenga mayor promedio será el ganador.

Si bien nuestro grupo (AUTOPÍA) tenía experiencia en conducción cooperativa entre vehículos basada en comunicaciones inalámbricas (usando el estándar IEEE 802.11g), la mayoría de estas maniobras se habían realizado en entornos urbanos. Hasta ahora (salvo en los resultados presentados para el control lateral), nuestras velocidades no habían superado los 50 km/h, debido a las características de nuestro circuito con curvas de aproximadamente 90 grados, y con el segmento recto más largo de 220 metros. Por lo tanto, los mayores retos de nuestro equipo, eran:

- Añadir periféricos de seguridad para cumplir los requerimientos de la competición.
- Adaptar nuestro sistema de comunicación al protocolo CALM FAST/IEEE 802.11p.
- Desarrollar nuevos controladores capaces de trabajar en cualquier rango de velocidad.

Todas las mejoras realizadas se describen en los puntos siguientes de esta sección. En la figura 5.62 se muestra al equipo AUTOPÍA durante las semanas de preparación y durante el GCDC 2011.

5.7.1.1. Equipos participantes

Todos los equipos son europeos, sin embargo, algunos estaban apoyados por universidades fuera del continente. En total son nueve equipos, incluyendo al nuestro. A continuación se mencionan los demás equipos:



Figura 5.62: Imágenes de *Platero* -dorsal 3- y los miembros del grupo AUTOPIA en las pistas de pruebas y paradas en boxes del GCDC 2011

- **Annieway**: es un grupo de investigación del instituto de tecnología de Karlsruhe, Alemania. Están especialmente interesados en conducción autónoma y el desarrollo de sistemas ADAS. Es el equipo más experimentado de los participantes, ya que en 2007 fue uno de los equipos europeos que participó en el DARPA, donde llegaron a ser finalistas. El vehículo que utilizaron en el GCDC fue un Volkswagen Passat, el mismo que 4 años antes participó en el DARPA (Kammel y Pitzer, 2008).
- **A-Team**: es un equipo de la universidad tecnológica de Eindhoven, Holanda. Sus miembros eran estudiantes del máster sobre Tecnología en Automoción y empleados de las empresas DAF ¹³ y TMC ¹⁴. Contaban con el vehículo más grande de la competición, un camión con remolque proporcionado por DAF (Bonsen et al., 2011).
- **Chalmers**: es un equipo formado por estudiantes y investigadores de la universidad tecnológica de Chalmers, Suecia y miembros del instituto Viktoria ¹⁵ y el instituto de investigación tecnológica SP ¹⁶. Algunos de sus socios y patrocinadores son: *Volvo Car Corporation*, *Denso*, *Viktoria Institute*, *AB Volvo* y *Scania*. El vehículo utilizado fue un Volvo S60 (modelo 2011), con sistema de control de crucero asistido incorporado de serie. La única diferencia con el otro equipo sueco (Halmstad) es que este vehículo era a gasolina (Augusto et al., 2011).
- **FUTURUM**: es un equipo formado por: el instituto Fontys Hogenscholen ¹⁷, la universidad de Twente ¹⁸, ambos en Holanda, y la universidad de Waterloo, en Ca-

¹³<http://www.daf.com/EN/Pages/Homepage-DAF-Trucks-NV.aspx>

¹⁴<http://www.tmc-automotive.nl/>

¹⁵<http://www.viktoria.se/>

¹⁶<http://www.sp.se>

¹⁷<http://fontys.edu/Default.aspx>

¹⁸<http://www.utwente.nl/en>



Figura 5.63: Imagen con todos los equipos participantes del GCDC 2011, en las instalaciones de TNO en Helmond, Holanda

nadá ¹⁹. El equipo está formado por estudiantes, investigadores e ingenieros de los diferentes centros, y el vehículo utilizado es un *Smart* de dos plazas (Das et al., 2011).

- **Halmstad**: es uno de los tres equipo suecos inscritos en la competición, junto con Chalmers y Scoop. El proyecto CoAct ²⁰ funciona como paraguas común para los diferentes patrocinadores. El equipo de Halmstad está formado por estudiantes e investigadores de esta universidad. También usaron un volvo S60, con motor de diesel (Lidstrom et al., 2011).
- **Letonia**: es un equipo conformado por miembros de la universidad de Letonia ²¹ y del Instituto de Electrónica y Ciencias de la Computación de Riga ²². Su área de conocimiento se centra en comunicaciones y sensores. El vehículo que utilizaron fue un Mazda 6. Era quizás el equipo con menor presupuesto. Después de 2 semanas de intenso trabajo no pudieron competir. Su vehículo presentó muchos fallos mecánicos y electrónicos (Strazdins et al., 2011).
- **Mekar**: es el equipo más plural de la competición, conformado por miembros de la Universidad Técnica de Estambul ²³, Universidad de Arel ²⁴, Universidad de Okan ²⁵, y el Centro de Investigación y Desarrollo de Tofas-Fiat ²⁶, todos ubicados en Estambul, Turquía. Además la Universidad del estado OHIO en Columbus, E.E.U.U. ²⁷ ha colaborado con el equipo Mekar para la preparación del GCDC. Utilizaron un

¹⁹<http://uwaterloo.ca/>

²⁰<http://www.chalmers.se/safer/EN/projects/pre-crash-safety/projects/coact>

²¹<http://www.lu.lv/eng/>

²²<http://www.edi.lv/en/home/>

²³<http://www.itu.edu.tr/en/>

²⁴<http://www.iau.edu.tr/arel/en/index.html>

²⁵<http://www.okan.edu.tr/en>

²⁶<http://english.tofas.com.tr/>

²⁷<http://www.osu.edu/>

Fiat Línea, con un motor eléctrico. Ésto los limitaba considerablemente a la hora de desplazarse, debido a la poca autonomía que tiene este vehículo (Uygan et al., 2011).

- **Scoop**: Es el último de los equipos de Suecia. Está conformado por estudiantes e investigadores de las Escuelas de Ingenieros Eléctricos e Industriales del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo ²⁸, e ingenieros de SCANIA en Södertälje ²⁹. El vehículo utilizado es un camión de Scania, modelo R730. El equipo Scoop trabaja en el desarrollo de seguimiento de pelotones de camiones, en la competición del GCDC probaron sus algoritmos con otro tipo de vehículos (Alam et al., 2011).

Estaban previstos que participaran otros dos equipos: el *Mira* y el *TuHan*. El primero era el único formado por ingenieros de una empresa privada (de Inglaterra), mientras que el segundo era un proyecto conjunto entre la universidad de Delft y la de HAN, ambas en Holanda. Sin embargo, no pudieron asistir. En la figura 5.63 se muestra una foto con todos los vehículos participantes en los días previos a la competición.

5.7.2. Modificaciones realizadas a *Platero* para el GCDC

El vehículo escogido por el equipo AUTOPIA para participar en el GCDC 2011 fue *Platero*, uno de los dos vehículos a gasolina. Las furgonetas y el autobús eléctrico fueron descartados por su dependencia energética, además que la velocidad que exigían en la competición era muy alta para ellos. Aunque es un primer intento se pensó en *Clavileño* (por ser el más vistoso y utilizado de los vehículos), la imposibilidad de cubrirlo con una capota durante los días de la competición, lo descartó.

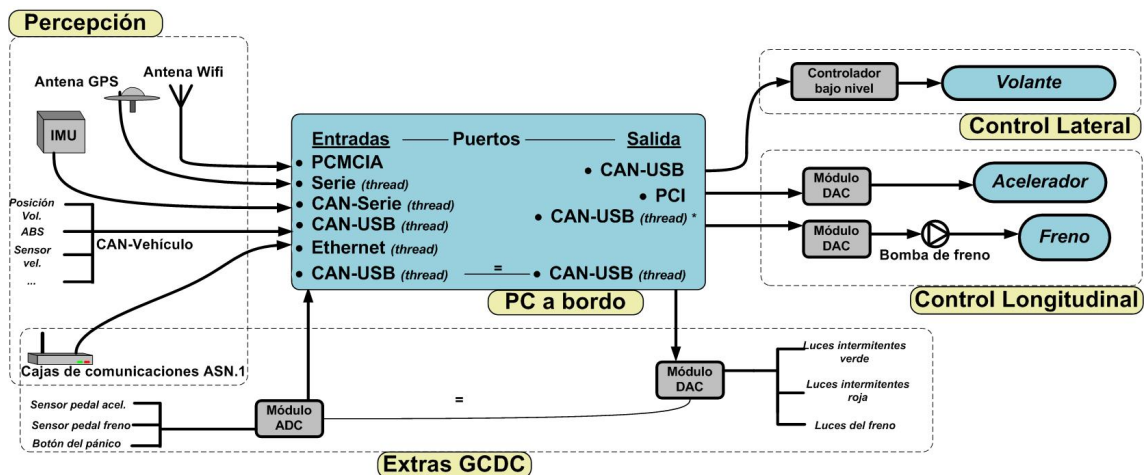


Figura 5.64: Arquitectura de control de *Platero*, incluyendo modificaciones para el GCDC

En la figura 5.64 se muestra el esquema de control de *Platero*. Como se mencionará en la sección 5.7.2.1, los organizadores del GCDC exigían unos requisitos, tanto de hardware como de software, para poder participar, que nos obligó a añadir nuevos periféricos a la arquitectura de control, tales como: luces intermitentes rojas y verdes, luces de freno activas, sensores en los pedales del vehículo y un botón para paradas de emergencia.

También eran necesarias unas luces de aviso para indicar en qué momento el vehículo estaba circulando en modo manual o automático. Para solventar este problema, se colocaron

²⁸<http://www.kth.se/en>

²⁹<http://www.scania.se/>

en el techo del vehículo luces tipo torre de baliza ³⁰, intermitentes y con una alimentación de 24 voltios (con lo que se utilizó un convertidor DC-DC de 12 a 24 voltios), siendo visibles desde cualquier lado del mismo.

Para encender las luces se utilizaron las salidas del modulo digital-analógico ³¹, muestra la figura 5.64. Cada señal está conectada a un relé que conmuta la alimentación para las señales de salida (luces intermitentes y freno) y que funcionan como señales ON/OFF para cada entrada del sistema (señales de los pedales y botón de desactivación total).

5.7.2.1. Requisitos del GCDC

En el documento técnico y de reglas para competir en el GCDC (Kwakkernaat, 2011), se especifican todos los requisitos exigidos por la competición. Estos se dividen en requisitos para los conductores, el vehículo, los sensores, la seguridad en la conducción y las comunicaciones. A continuación se enumeran los más importantes:

- *Vehículos*: solo se permitían vehículos con marcha automática. Además, éste debe tener una radio FM, cinturones de seguridad, matricula, seguro al día y papeles en regla.
- *Volante*: este siempre debe estar controlado por el conductor. Debe haber un copiloto, dedicado a ejecutar el programa de control. El piloto debe estar en todo momento atento a la carretera.
- *Luces intermitentes*: éstas se usan para indicar el modo de conducción. Una luz verde para indicar que el vehículo está en modo autónomo, y una luz roja cuando el vehículo este en modo manual.
- *Botón rojo de emergencia*: ubicado en parte central del tablero del vehículo. Este debe desactivar todo los actuadores y el programa de control, para que el vehículo pueda conducirse en modo manual. Cuando se activa, la luz roja debe estar encendida y la verde apagada.
- *Sensores en los pedales*: Cuando el conductor pise los pedales ocurre lo mismo que cuando se presiona el botón rojo: se detiene el programa de control, se dejan los actuadores en modo manual, y la luz roja se enciende y la verde se apaga.
- *Luces traseras del freno*: éstas deben encenderse siempre que el conductor pise el freno (como en un vehículo convencional), y cuando el programa de control envíe una consigna de freno al actuador.
- *Precisión en las medidas*: la tabla 5.6 resume la precisión exigida en cada medida.
- *Distancia de seguridad*: el objetivo de los experimentos en la autovía es mantener una distancia óptima entre vehículos durante cada prueba. Esta distancia se muestra en la ecuación 5.19.

$$Distancia_{optima} = d_{min} + h * v \quad (5.19)$$

Donde d_{min} es la distancia mínima entre los vehículos detenidos. Al principio se fijó en 13.8 metros, pero durante las diferentes pruebas de clasificación variaba entre 10 y

³⁰Modelo KombiSIGN 71, marca Werma.

³¹Módulo MCB-90 de Dismuntel SAL.

Parametro	Valor
Posición en coordenadas UTM	$<1m$
Velocidad	$<0,5 \text{ m/s}$ ó $1,8 \text{ km/h}$
Aceleración	$<0,2 \text{ m/s}^2$
Frecuencia de envío de mensajes	10 Hz

Tabla 5.6: Errores máximos permitidos en los sensores de posición velocidad y aceleración en el GCDC

20 metros ³². h es el tiempo mínimo requerido para alcanzar al líder, y estaba fijado en 0,6. Por último, v es la velocidad real del vehículo, medida en m/s.

- *Controlador*: En la tabla 5.7 se muestra el rango de operaciones exigido por los organizadores (Kwakkernaat, 2011).

Característica	Especificación
Velocidad	<i>de 0 a 80 km/h</i>
Aceleración máxima permitida	$2,0 \text{ m/s}^2$
Aceleración máxima recomendada	$1,5 \text{ m/s}^2$
Desaceleración máxima permitida	$-4,5 \text{ m/s}^2$
Desaceleración máxima recomendada	$-4,0 \text{ m/s}^2$

Tabla 5.7: Parámetros exigidos por los organizadores del GCDC para el cálculo de medidas

- *Comunicaciones*: El vehículo debía ser capaz de enviar y recibir información de otros vehículos (V2V) y de la infraestructura (V2I) de acuerdo con en el protocolo IEEE 802.11p.

5.7.3. Implementación de comunicaciones inalámbricas

El segundo problema que teníamos que solucionar para competir en el GCDC, era adaptar nuestro sistema de comunicaciones al protocolo requerido por la competición. En nuestro grupo, ya se habían desarrollado diferentes maniobras cooperativas basadas en comunicaciones inalámbricas. Por lo que, en un principio, solo debíamos adaptarnos a la estructura de datos utilizada por los equipos del GCDC.

Las comunicaciones del GCDC se realizaron a través de módulos inteligentes de comunicación, los cuales se ejecutaban bajo un servidor CALM. La arquitectura CALM define protocolos e interfaces para una gran cantidad de escenarios, abarcando una gran cantidad de modos de transmisión y múltiples métodos, basado en la nueva tecnología IPv6, dedicada a los sistemas ITS (Ernst et al., 2009). Estos módulos de comunicación son capaces de enviar y recibir información con un gran número de destinatarios asociados, en función de los diferentes escenarios dispuestos en la competición (urbanos, seguimiento de pelotón, semáforos, entre otros). Los organizadores nos suministraron dos enrutadores CALM para probar las comunicaciones en nuestros vehículos (de Jongh, 2011). Éstos ponían comunicarse a través de *sockets* UPD con otro ordenador. Lo que limitó nuestro problema a definir los nuevos paquetes de datos que finalmente se enviarían por estos dispositivos.

³²Sobre todo los equipos con camiones, *ATeam* y *Scoop*, exigían que ésta fuera mayor, para evitar accidentes que lamentar en frenadas de emergencia.

Numero de bits	Campo
4	Tipo de mensaje
16	Número de secuencia
32	Tiempo en segundos
10	Tiempo en milisegundos
3	Prioridad del mensaje
8	<i>Longitud dada por NodeID</i>
8	<i>valor si el NodeID menor que 128</i>
2	Tipo de nodo
4	Indice del Choice
32	Longitud (Posición)
31	Latitud (Posición)

Tabla 5.8: Codificación en bits de la *Información estática de la RSU*

Los organizadores utilizaron el estándar ASN.1 (*Abstract Syntax Notation One*) para la compresión y transmisión de datos. Sin embargo, algunos en los boletines y foros de la competición advirtieron que las implementaciones en C++ descargadas de la red por otros participantes eran poco fiables, por lo que la siguiente decisión importante fue implementar un traductor de C++ a ASN.1 en nuestro código de control, esto es, codificar bit a bit cada mensaje para comunicarnos con los módulos facilitados por TNO. No pudimos hacerlo hasta llegar a Helmond, ya que, en los módulos que nos enviaron a Madrid, aún no estaba implementado el software definitivo y no existían manuales que explicaran claramente su modo de funcionamiento.

5.7.3.1. Las comunicaciones en el GCDC

En las dos semanas previas a la competición, nuestro trabajo se centró en desarrollar la generación de mensajes en el formato ASN.1. (ITU-TX.680, 2002). En retrospectiva, esta fue la mejor decisión, ya que los organizadores adaptaron sus módulos de comunicaciones para que se comunicaran a través de *sockets* UDP.

El estándar de comunicaciones del GCDC con los enrutadores CALM estaba planteado como una cadena de bits capaz de contener las estructuras de datos, usando terminología ASN.1. Todos los mensajes tienen campos comunes, los cuales contienen datos sobre el tipo de mensaje que se está enviando. Además, cada mensaje tiene su propia frecuencia de transmisión y algunos funcionan solo cuando se solicitan, bien enviados por los vehículos como por la infraestructura. En total fueron 10 tipos de mensajes, aunque no todos llegaron a implementarse en el GCDC. A continuación se mencionan solo los que se probaron en la competición: Información dinámica del vehículo, información estática del vehículo, información estática de la RSU, acción del pelotón, información de los semáforos y estado de la prueba. El resto de estructuras se mencionan en (de Jongh, 2011).

En la tabla 5.8 se muestra el detalle de una de las estructuras utilizadas: información estática de la RSU. La codificación y decodificación según las reglas del estándar ASN.1 fue realizada por miembros del grupo AUTOPIA con la ayuda de una aplicación en JAVA desarrollada por TNO. La mayoría de los equipos trabajaba en un nivel superior, que les permitía enviar/recibir datos. Sin embargo, nosotros decidimos implementar nuestro propio software para codificar/descodificar. La tabla 5.8 muestra a estructura del mensaje. El tamaño de estos campos es fijo, salvo los que están escritos en cursivas. Éstos requieren

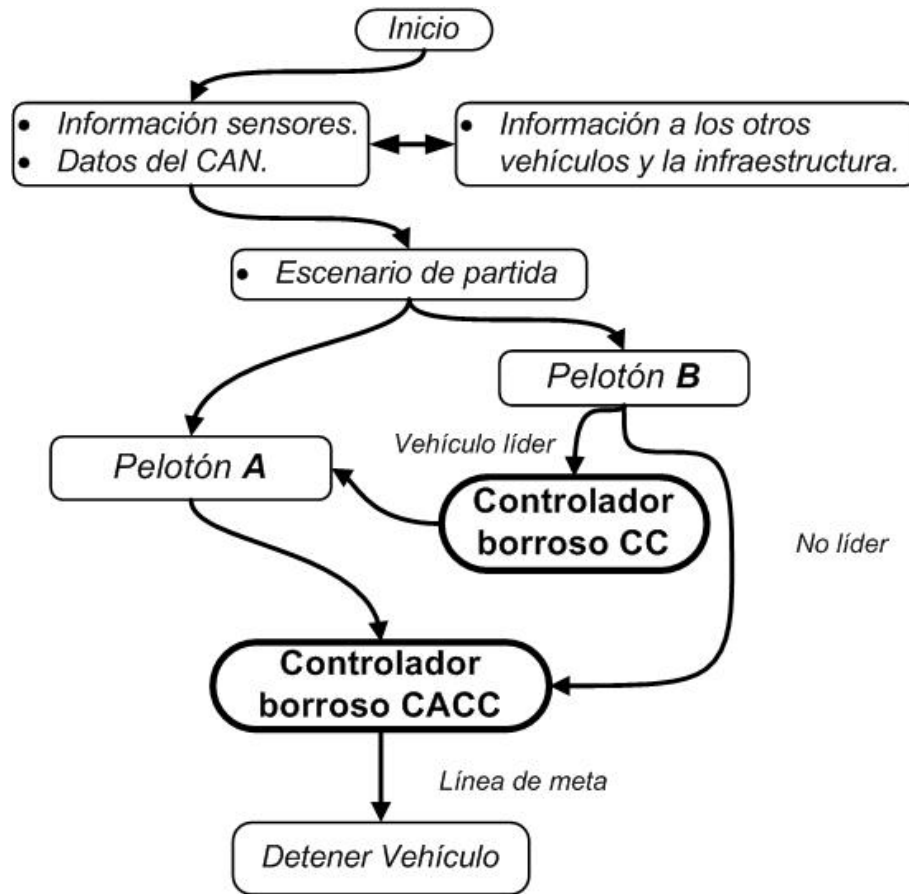


Figura 5.65: Diagrama de estados para el control longitudinal de AUTOPIA en el GCDC

especial atención debido a que su tamaño está determinado por el valor identificador del nodo (*NodeID*), aunque en la práctica, este campo de *NodeID* casi nunca excedía los 128 bytes. En este ejemplo, el tamaño total de la estructura es de 19 bytes.

5.7.4. Arquitectura de control en el GCDC

Nuestro sistema de control se basa en controladores borrosos, usados en maniobras en entornos urbanos. El control lateral no está considerado en esta edición del GCDC, por lo que solo se ha implementado el control longitudinal según los requisitos de la competición. En este sentido, y dependiendo de la posición de salida de nuestro vehículo (figura 5.61), se activa uno de los siguientes controladores:

- **CACC siguiendo al líder:** se activa siempre que tengamos un vehículo delante. Este controlador es un ejemplo de los nuevos sistemas de cooperación para el control crucero adaptativo -CACC-. Su prioridad es reaccionar rápidamente ante una posible acción del vehículo predecesor. El controlador ha sido sintonizado basándonos en la experiencia del grupo en controladores longitudinales, pero adaptando las funciones de pertenencia a altas velocidades.
- **CC liderando un pelotón:** este caso ocurre cuando el vehículo se encuentra de primero en el segundo semáforo (figura 5.61). La prioridad del controlador es man-

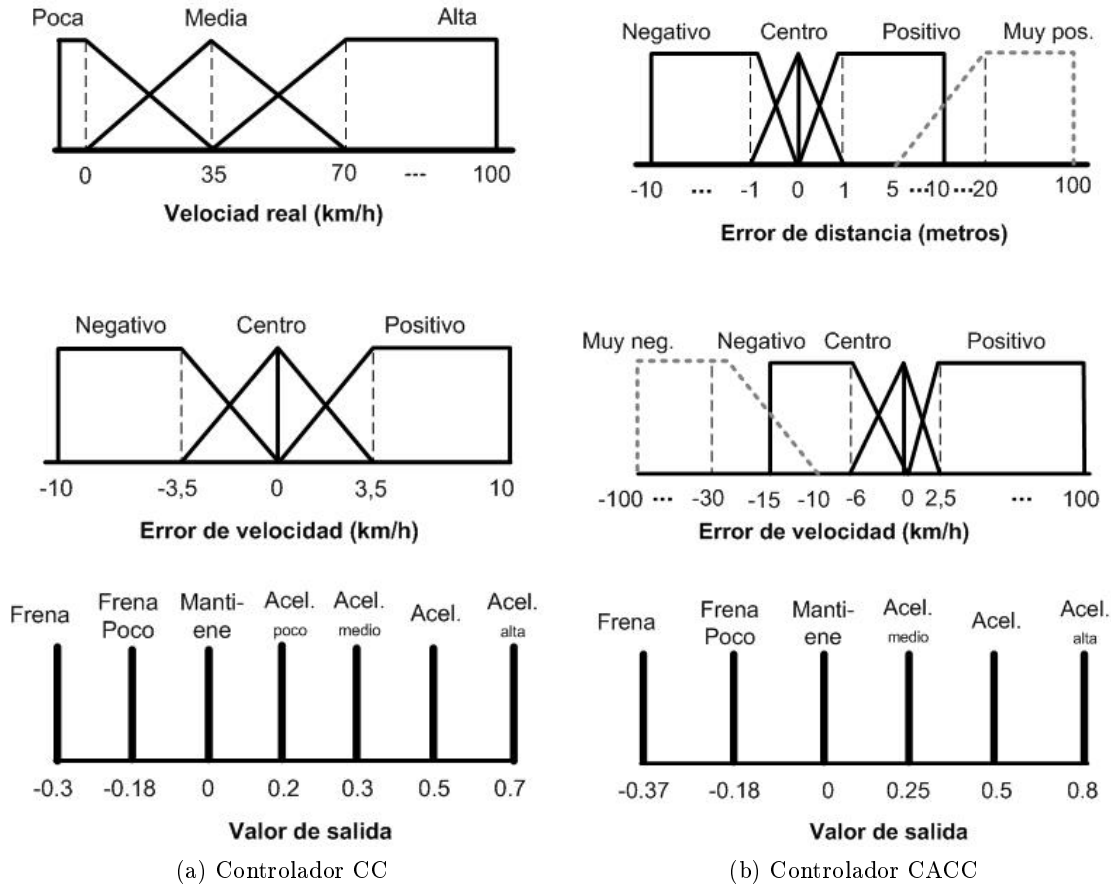


Figura 5.66: Funciones de pertenencia del CC y CACC por en el GCDC 2011

tener un control de cruceo confortable para los pasajeros de vehículo, además de optimizar la acción sobre los actuadores para evitar frenadas bruscas.

Antes de explicar cada controlador, es necesario definir un algoritmo de decisión que active cada uno en el momento adecuado. Considerando la ecuación 5.19, d_{min} que determina la distancia mínima al vehículo precedente cuando se encuentra detenido. Las condiciones para la conmutación entre ambos controladores se han establecido según las ecuaciones 5.20 y 5.21.

$$CCcontroller \text{ Si } d_{act} > v_{act} * t - 0,5 * a_{max} * t^2 - d_{min} \quad (5.20)$$

Y

$$CACCcontroller \text{ Si } d_{act} \leq v_{act} * t - 0,5 * a_{max} * t^2 - d_{min} \quad (5.21)$$

Donde a_{max} es la máxima deceleración permitida ($-4,5 \text{ m/s}^2$), v_{act} es la velocidad actual del vehículo y d_{act} es la distancia instantánea entre nuestro vehículo y el vehículo que tenemos delante.

En la figura 5.65 se muestra el algoritmo de decisión implementado para alternar ambos controladores en las pruebas de clasificación.

error de velocidad	Velocidad real		
	Poca	Media	Alta
Negativo	<i>Mantiene</i>	<i>Frena_poco</i>	<i>Frena</i>
Centro	<i>Mantiene</i>	<i>Acel._poco</i>	<i>Acel._medio</i>
Positivo	<i>Acel._medio</i>	<i>Acel.</i>	<i>Acel._alta</i>

Tabla 5.9: Reglas borrosas para el control de cruceo para altas velocidades

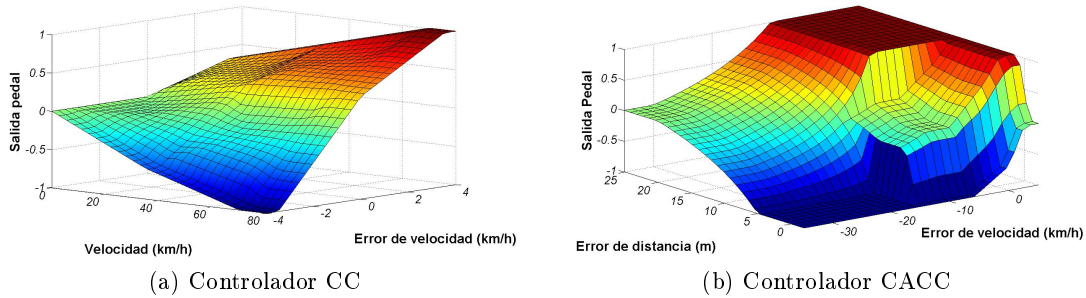


Figura 5.67: Superficies de control de los controladores borrosos utilizados por en el GCDC 2011

5.7.4.1. Controlador CC para altas velocidades

El control de cruceo descrito a continuación utiliza las mismas variables de entrada que el controlador longitudinal a bajas velocidades (capítulo 4), sólo que ajustadas para este nuevo escenario: la conducción a altas velocidades.

La figura 5.66a muestra las funciones de pertenencia asociadas a la velocidad y el error de velocidad con respecto a la referencia a seguir. En líneas generales, el rango de ambas funciones de pertenencia ha sido ensanchado para abrir más la acción de estas variables en el control de cruceo.

En la parte baja de la figura 5.66a, se muestran los nuevos valores de las funciones singleton de salida. Los valores de salida del controlador están normalizados entre $[-1, 1]$, donde los positivos están relacionados con la acción de acelerador, y los negativos con la acción sobre el freno. El valor de la acción máxima sobre el acelerador está limitado al 70 %, mientras que para el freno está al 30 %, para adaptarnos a los requisitos de aceleración y deceleración permitidos en la competición (tabla 5.7).

En la tabla 5.9 está representada la base de reglas para el control de cruceo a altas velocidades. Finalmente, en las superficies de control que se muestran en la figura 5.67a se puede apreciar que la acción de control es suave, en función de las variables de entradas escogidas.

5.7.4.2. Controlador CACC para altas velocidades

El segundo controlador implementado fue diseñado tomando como referencia los trabajos previos del grupo en el ámbito del control de cruceo adaptativo en entornos urbanos. El objetivo principal es seguir al vehículo que se encuentra delante a la menor distancia, según la ecuación 5.19. En este caso, la acción debía de ser un poco más agresiva, por lo que la acción sobre el acelerador se fijó en 85 % de su valor máximo, y la acción del freno se amplió hasta un 37 %. Estos valores fueron establecidos experimental en la autopista

Error de velocidad	Error de distancia		
	Negativo	Centro	Positivo
Negativo	<i>Frena</i>	<i>Frena_poco</i>	<i>Mantiene</i>
Centro	<i>Frena_poco</i>	<i>Mantiene</i>	<i>Acel</i>
Positivo	<i>Mantiene</i>	<i>Acel._medio</i>	<i>Acel._alta</i>

Tabla 5.10: Reglas borrosas para el controlador CACC

A270, entre Helmond y Eindhoven (figura 5.60), y en la pista de pruebas facilitadas por uno de los patrocinadores, dos días antes de la competición.

Las variables de entrada del controlador se escogieron para dar la prioridad a la distancia con respecto al vehículo predecesor. En la figura 5.67b se muestran las funciones pertenencia utilizadas y los correspondientes singleton del salida. A continuación se explica cada una de estas entradas:

- **Error de distancia:** se calcula con la diferencia de posición entre nuestro vehículo y el que circula delante, manteniendo la distancia de seguridad requerida por la competición (ecuación 5.19), en metros. Se han definido tres funciones de pertenencia entre los -1 y 1 metros, para mantener al vehículo lo más cerca posible de la referencia. Una cuarta función de pertenencia se añadió a posteriori (*muy positiva*, figura 5.67b), para posibles perfiles de velocidad con aceleración mayores a la permitida en la competición. Esto se hizo porque se comprobó durante las pruebas, algunos perfiles de velocidad eran muy agresivos. Para ello, se añadió una regla para incrementar la acción sobre el acelerador en caso de perfiles de aceleración cercanos a los $2,0 \text{ m/s}^2$.
- **Error de velocidad:** el error de velocidad se calcula con respecto al vehículo precedente. A diferencia de la otra entrada, ésta ha sido definida de forma asimétrica. En el caso de valores positivos, es decir, el vehículo líder circula a mayor velocidad, la acción es rápida con el fin de llegar a la velocidad del líder. Para el caso en que el error de velocidad es negativo, la acción sobre el freno es más suave con el fin de dar siempre prioridad a la otra variable de control. Como ocurrió con el error de distancia, una cuarta función de pertenencia ha sido añadida (*Muy negativo*). Para incrementar la acción sobre el freno en el caso de frenadas bruscas del vehículo precedente.

En la tabla 5.10 se muestra la base de reglas para el controlador CACC. A continuación se mencionan las dos reglas que han sido añadidas para incrementar la acción de control en situaciones extremas:

SI *Error de velocidad* Muy neg. **ENTONCES** *Pedal* frena.

SI *Error de distancia* Muy pos. **ENTONCES** *Pedal* acelera.

En la figura 5.67b se muestra la superficie de control con todas la reglas utilizadas. Podemos observar que el controlador permite cambios rápidos cerca de cero en ambas variables, y su a vez acciones de control más suaves en valores altos con el fin de prevenir aceleración fuera del rango permitido.

5.7.5. Experimentos

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, con las comunicaciones funcionando, se realizaron varias pruebas para ajustar los controladores. Luego, durante la competi-

Experimentos	Error de velocidad		Error de distancia	
	medio	mediana	medio	mediana
Experimento 1	1.13	0.58	1.52	0.91
Experimento 2	3.0713	1.64	2.07	0.90
Experimento 3	1.25	0.72	0.88	0.58
Prueba 1	5.95	2.79	7.67	2.94
Prueba 2	7.28	3.87	11.95	3.20
Prueba 3	7.23	4.22	18.0	5.82
Prueba 4	6.71	3.01	16.86	3.81
Prueba 5	4.24	2.71	2.84	1.62
Prueba 7	6.42	3.55	15.85	1.50
Prueba 8	3.46	2.51	1.98	1.09
Prueba 10	4.01	2.69	2.95	1.74
Prueba 11	5.75	2.97	13.61	1.71
Prueba 12	3.85	2.70	3.33	2.17
Prueba 13	6.89	5.59	14.32	7.21
Prueba 14	6.23	3.49	16.52	1.54
Prueba 15	4.57	2.54	3.38	1.33
Prueba 16	5.01	3.35	8.88	4.27
Prueba 17	3.97	2.59	6.73	1.84

Tabla 5.11: Error de los diferentes experimentos con el vehículo precedente

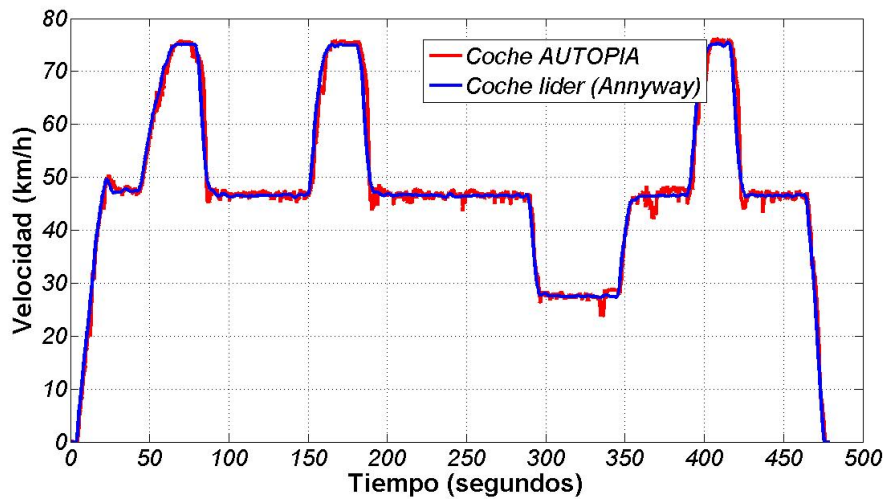


Figura 5.68: Experimento 1: Velocidades del vehículo líder -Anniway- y el seguidor -AUTOPÍA-

ción, se realizaron alrededor de 20 pruebas de clasificación, con los vehículos que lograron establecer las comunicaciones y pasar los requisitos mínimos de seguridad para participar (sección 5.7.2.1).

En esta sección se muestran los experimentos realizados en el GCDC. Estos se dividen en dos: pruebas previas y pruebas de clasificación. En la tabla 5.11 se enumeran los errores de velocidad y distancia en cada uno de los experimentos presentados en esta sección. A

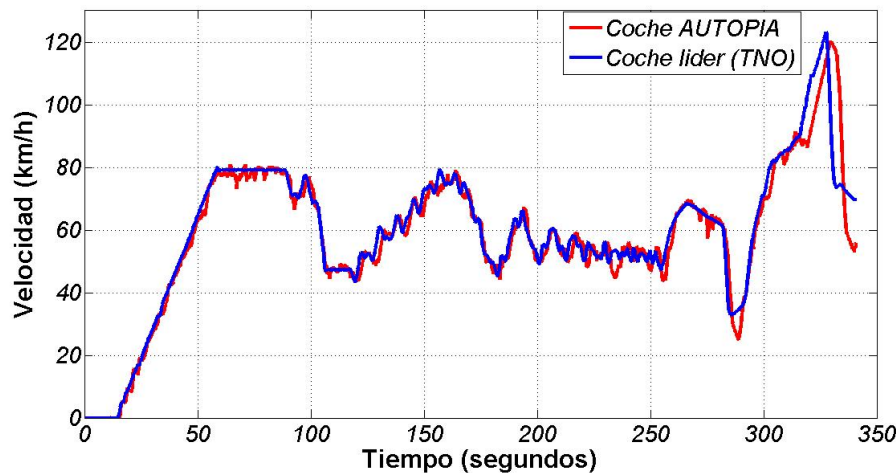


Figura 5.69: Experimento 2: Velocidades del vehículo líder -TNO- y el seguidor -AUTOPIA-

continuación se explica cada uno de ellos.

5.7.5.1. Pruebas previas al GCDC

Los primeros experimentos ³³ del controlador longitudinal para autovías propuesto en esta tesis, se realizaron en un circuito de pruebas facilitado por uno de los patrocinadores del GCDC ³⁴. Donde se logró establecer comunicación con varios equipos (específicamente con el líder de la competición -vehículo TNO-, Annieway, Halmstad y Scoop), y con estos datos, se ajustaron los controladores borrosos, que hasta ahora, solo habían sido utilizados a bajas velocidades.

El primer experimento se realizó teniendo delante al equipo Annieway. En la figura 5.68 se muestran las velocidades alcanzadas. Se puede apreciar que se llega hasta los 75 km/h, y además el controlador mantiene la velocidad con respecto a su predecesor.

Las dos variables de control son el error de velocidad y el error de distancia con respecto al vehículo precedente. En la figura 5.71, se muestran ambos errores en cada uno de los experimentos previos al GCDC. La grafica azul corresponde al primer experimento. Podemos observar la respuesta del controlador cuando el vehículo precedente se aleja, es decir, tanto el error de velocidad y de distancia aumentan (alrededor de los segundos 150, 330 y 400), y cuando ocurre lo contrario, que el vehículo precedente frena (alrededor del segundo 180 y 420). En la tabla 5.11 se muestran los errores medios y la mediana de ambos errores. En ambos casos son valores muy bajos, mostrando el buen funcionamiento del sistema a velocidades altas y sin cambios bruscos.

El segundo de los experimentos previos al GCDC se muestra en la figura 5.69. En este caso delante al vehículo de TNO con el perfil de velocidad implementado en la competición. Aunque el controlador aún necesitaba algunos ajustes, su comportamiento fue bastante bueno. El valor del error medio es más alto que en el experimento anterior (debido a los grandes cambios en la consigna) la mediana del error se mantiene en los mismo valores (0,90), debajo de un metro (tabla 5.11).

³³El día jueves y viernes previos al GCDC.

³⁴Un famoso fabricante de camiones holandeses.

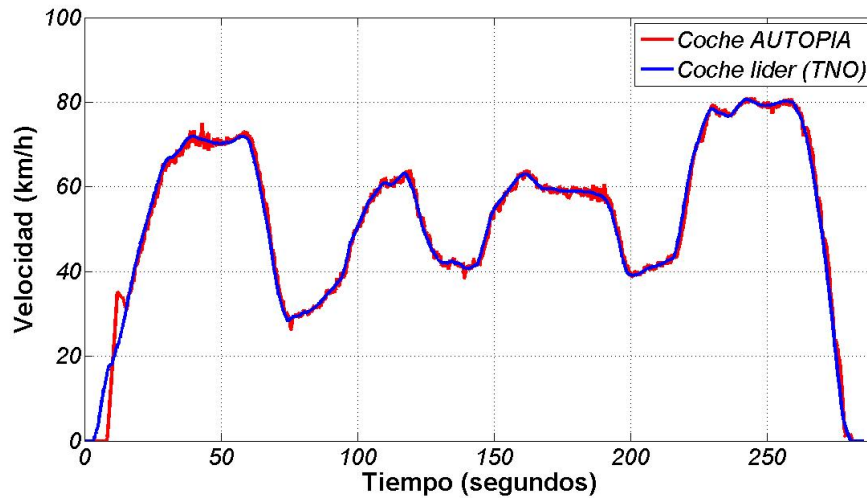


Figura 5.70: Experimento 3: Velocidades del vehículo líder -TNO- y el seguidor -AUTOPIA-

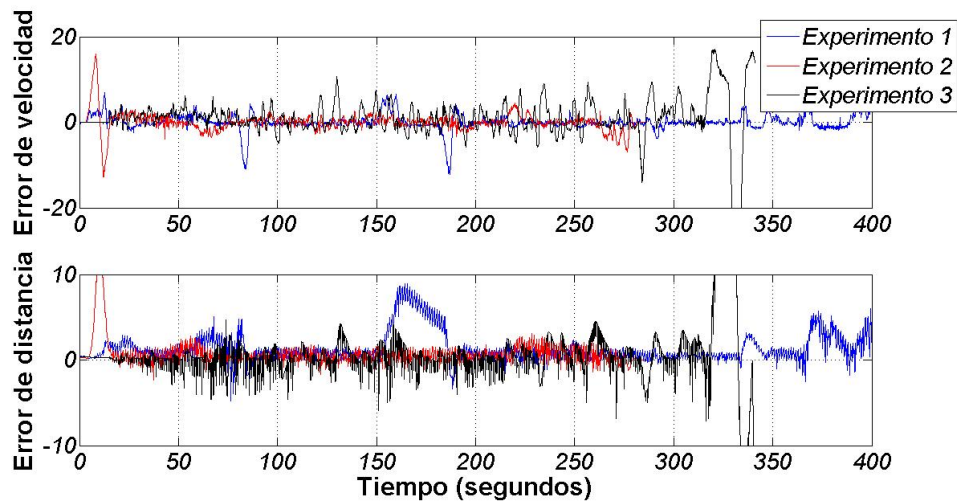


Figura 5.71: Error de velocidad y error de distancia en las pruebas previas al GCDC

En el experimento que se muestra en la figura 5.69 se puede apreciar como el coche líder alcanza velocidades mayores a los 120km/h, lo que nos permitió probar el sistema hasta las velocidades máximas permitidas en autovías.

En la figura 5.71, grafica roja, se pueden apreciar los errores (de velocidad y distancia). Puede observarse que aunque el error aumentó al final del experimento (ya que no estaba diseñado para cambios bruscos de velocidad), se aprecia en la figura 5.69 que el sistema responde con retardo, pero el controlador logra alcanzar la velocidad del vehículo líder, reduciendo a su vez el error de distancia al final del experimento.

Las últimas pruebas antes de la competición se realizaron con la idea comprobar la repuesta del sistema en las condiciones más extremas. En este sentido, el vehículo líder (TNO) siguió un perfil de velocidad más agresivo, poniendo a prueba no solo nuestro sistema de control, sino también la capacidad de nuestros actuadores (el acelerador y

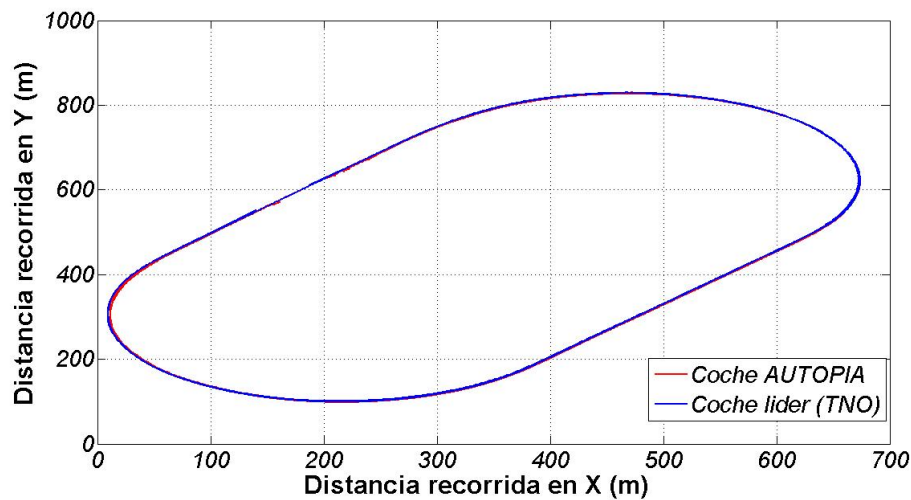


Figura 5.72: Experimento 3: Posición de los vehículos en coordenadas UTM

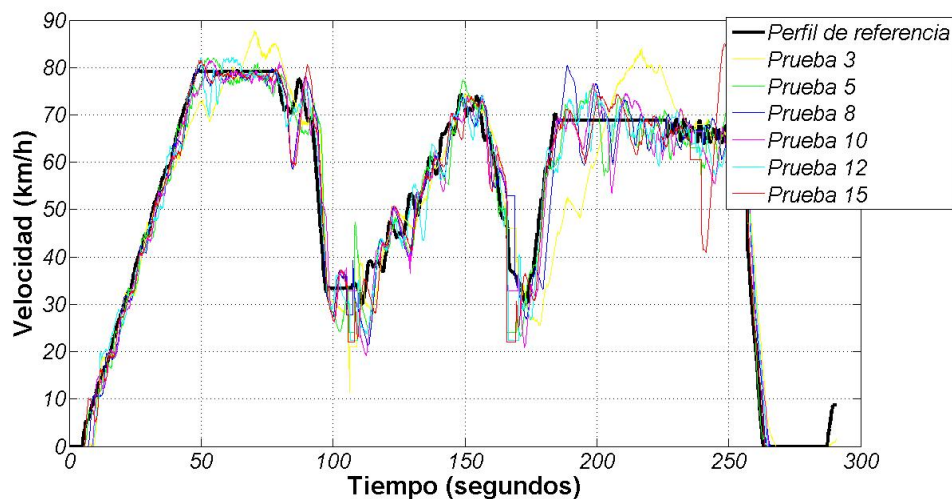


Figura 5.73: Pruebas de clasificación con el líder delante

la bomba de freno). En la figura 5.70 se muestra el perfil de velocidad del vehículo de TNO y nuestra velocidad. Como se aprecia en la grafica, este experimento muestra que el controlador empieza con un poco de retardo, debido a que no habíamos activados los interruptores de los actuadores. Sin embargo, podemos apreciar como el controlador alcanza la velocidad y la distancia del vehículo líder.

Es por esto que desde el segundo 20 del experimento (figura 5.71, grafica negra), es decir, después del arranque, tanto el error de velocidad como de distancia entre los vehículos se mantiene en valores bajos, a pesar de los bruscos cambios de consigna que el vehículo líder estaba realizando (figura 5.70). En este experimento es el que mejor desempeño ha mostrado nuestro controlador CACC, como se puede apreciar en la tabla 5.11. El error medio de distancia está por debajo del metro, y la media muestra un valor cercano a medio metro. Además, en este experimento se realizó una frenada final que llegó a los -3.5 m/s^2 de deceleración (de 80 km/h a 0 km/h, al final del experimento), y los frenos respondieron

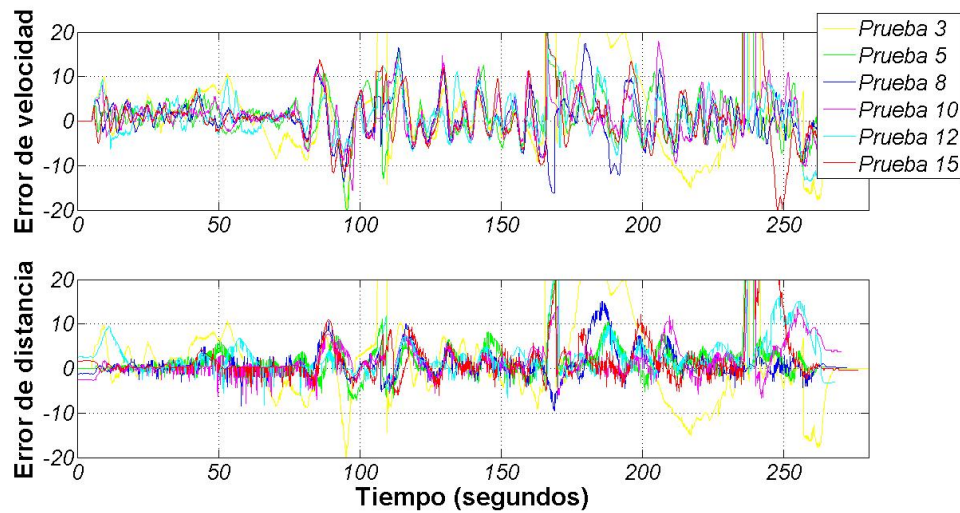


Figura 5.74: Error de velocidad y de distancia del experimento 5.73

adecuadamente.

Como se aprecia en la figura 5.72 el sistema de posicionamiento funciona correctamente en estas pistas. Eso explica el buen desempeño de los controlados, sobre todo en el experimento 3.

5.7.5.2. Pruebas de clasificación en el GCDC

En esta sección se describen las pruebas de clasificación en el GCDC 2011. El número total de pruebas de clasificación fue de veinte, diez por día. Nuestro vehículo fue uno de los que participó en todas las pruebas, sin embargo, muchos no pudieron concluir de forma autónoma, debido a que algunas veces los líderes del pelotón, o el vehículo precedente, no enviaban correctamente sus datos. Otras veces fue por fallos en nuestro sistema. En los siguientes experimentos se muestran solo las pruebas que pudieron ser terminadas.

*Experimentos detrás de TNO o Annieway*³⁵

El controlador que se describe en esta sección realizaba el seguimiento con la información suministrada por el vehículo precedente. Por este motivo era de vital importancia que el vehículo líder nos enviara la información correcta. En la figura 5.73 se muestra 6 pruebas cuando teníamos al vehículo líder delante ó al equipo Annieway, que eran los que enviaban información más fiable. En estas graficas observamos como las primeras pruebas presentaban mayor error, debido a los fallos en la lectura del CAN del vehículo y bajo los puentes (sección 5.7.6).

A medida que avanzaban las pruebas logramos superar muchas de las adversidades. En la tabla 5.11 puede observarse como el error medio y la mediana son más altos en las pruebas 3 y 5 (amarilla y verde de la figura 5.74). Sin embargo y como se observa en la figura 5.74 el error de velocidad y distancia es muy bajo en algunas de estas pruebas, v.g.: pruebas 8 y 10. En la tabla 5.11 se observa que estos experimentos son los únicos con el error de distancia cerca al metro.

Por último, en la figura 5.75 se muestra la posición en coordenadas UTM de todas las pruebas de esta sección. Se observa como en la prueba 3 la señal se pierde durante varios

³⁵Este equipo resulto ser el campeón de la competición.

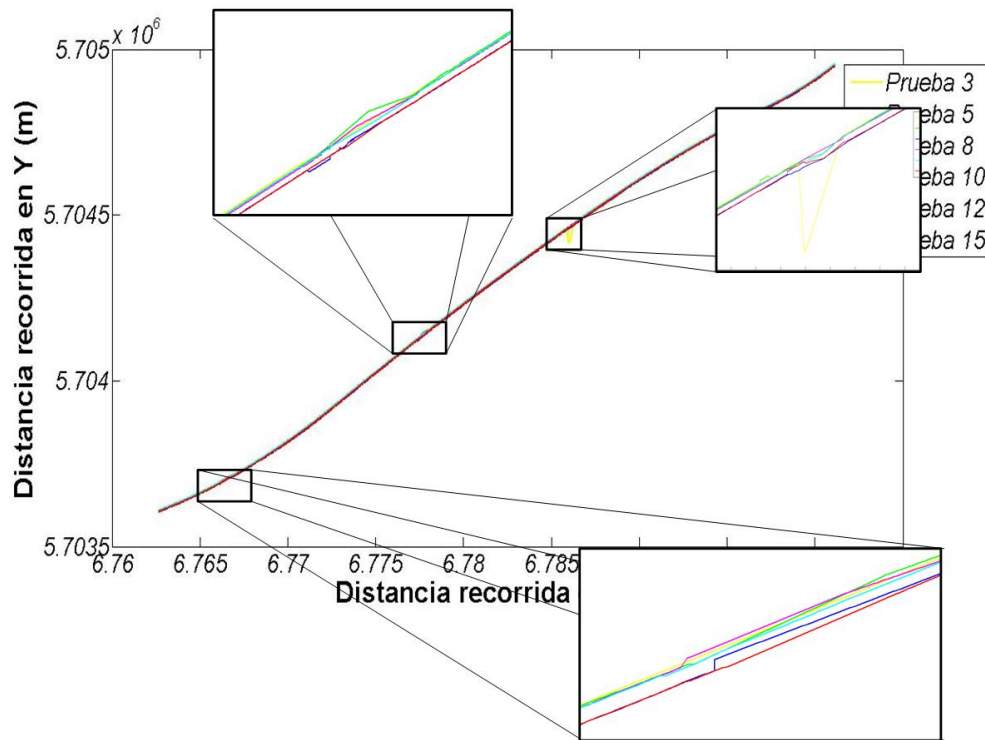


Figura 5.75: Posición en coordenadas UTM de las pruebas: 3, 5, 8, 10, 12, 15. Junto con los fallos en los puentes

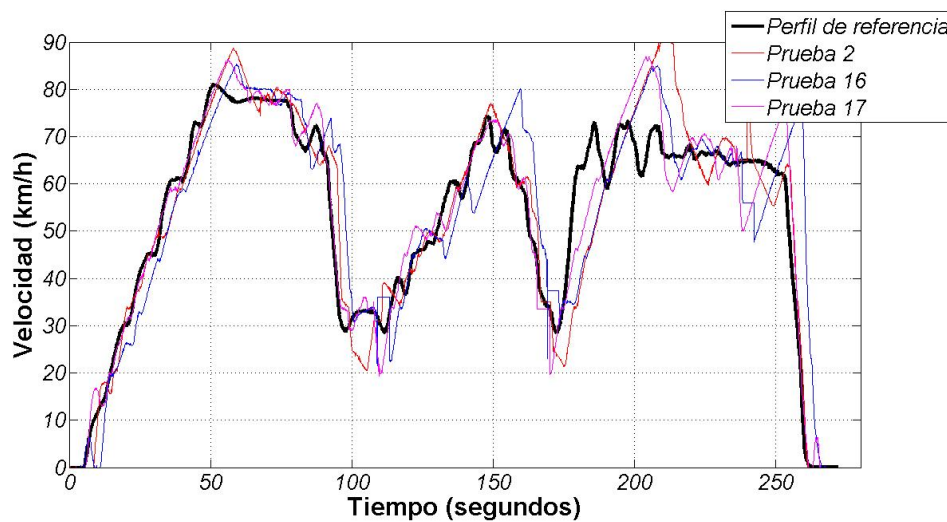


Figura 5.76: Pruebas de clasificación con cualquier otro vehículo delante

segundos, lo que hizo que el vehículo se frenase por seguridad, y los errores de distancia y velocidad crecieran considerablemente.

Experimentos detrás de otro vehículo

En la figura 5.76 se muestran las velocidades de las pruebas 2, 16, 17 del GCDC. La gráfica negra representa una de las referencias utilizadas (específicamente en la prueba 2) por el vehículo precedente, sin embargo, ésta cambia en función del equipo y de las

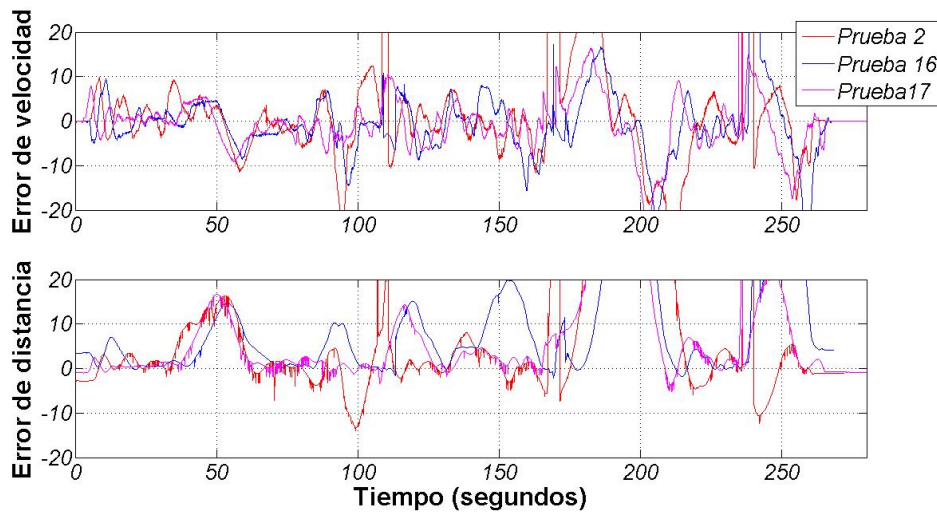


Figura 5.77: Error de velocidad y de distancia del experimento 5.76

pruebas de clasificación realizadas. En estas pruebas hubo fallos por la pérdida de la señal del GPS en los puentes, y por el efecto acordeón que se formaba en nuestro pelotón. Los numerosos saltos que se observan representan cuando el vehículo pasaba por debajo de los tres puentes del trayecto. Existen menos pruebas en esta posición debido a que muchas de ellas no pudieron concluir en forma autónoma, debido a que algunos equipos que se colaron delante enviaban constantemente datos erróneos.

Según la figura 5.77 se puede observar que en la prueba de clasificación número 2, el error de velocidad y distancia son mayores. Aunque como se aprecia en la mediana de la tabla 5.11, este error aumenta solo en las pérdidas de la señal por los puentes, y se recupera una vez superado este indecente.

Experimentos saliendo del pelotón B

Se han realizado cuatro pruebas de clasificación partiendo de esta posición. En líneas generales estos experimentos se realizaron correctamente, aunque al igual que en otros se registraron fallos al pasar por debajo de los puentes (en la sección 5.7.6 se explicará con más detalle).

En la figura 5.78 se muestran los perfiles de velocidad de las pruebas de clasificación 4, 7, 11 y 13, saliendo desde el segundo semáforo y desde la primera posición. En primer lugar, cuando la luz del semáforo del grupo B (figura 5.61) cambia a verde, nuestro vehículo debía alcanzar al pelotón precedente. Como podemos apreciar en la prueba 4 y 7 aún existían algunos fallos en nuestro programa de control, ya que aún no habíamos programado el límite de velocidad (fijado en 40 km/h) en nuestro control de cruce, por eso en esta prueba el vehículo acelera hasta alcanzar al pelotón precedente (grupo A, figura 5.61) sin mantener una velocidad constante.

En la prueba 11 se muestra nuestro sistema funcionando correctamente y manteniendo la velocidad de referencia en 40 km/h, hasta que el vehículo precedente arranca y empieza el *platooning*. Podemos observar que el control hace un uso óptimo de los actuadores, evitando velocidades superiores a los 50 km/h (límite urbano). Con esto, nuestro vehículo evita frenar repentinamente detrás del vehículo líder, manteniendo una velocidad ligeramente más baja que el límite indicado, y empezando a acelerar cuando el grupo A lo haga, activando seguidamente el controlador CACC.

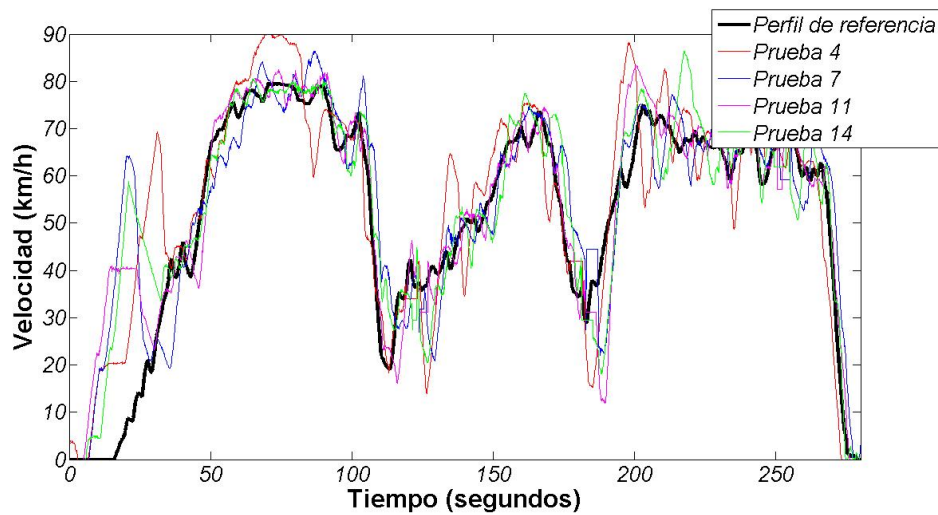


Figura 5.78: Pruebas de clasificación saliendo desde el segundo semáforo, primera posición

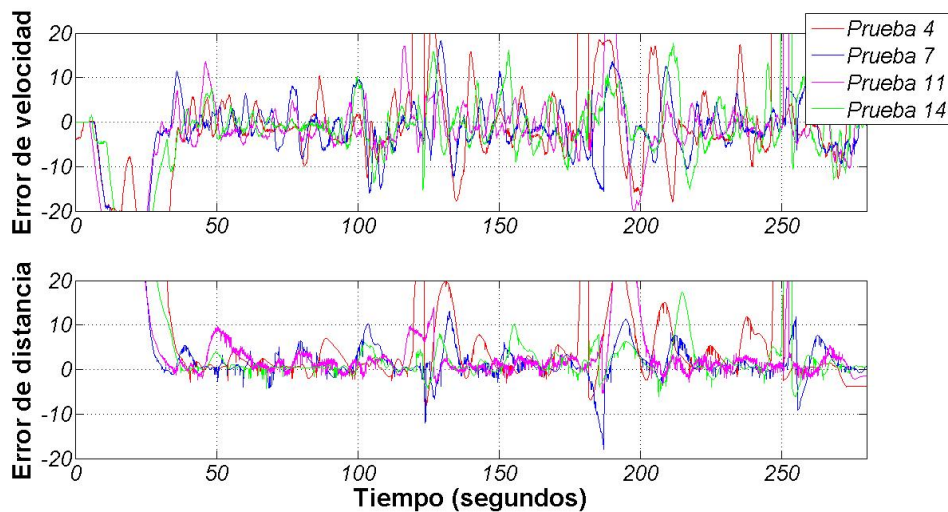


Figura 5.79: Error de velocidad y de distancia del experimento 5.78

En la figura 5.79 se puede observar el error de velocidad y distancia con el vehículo precedente. Ambos empiezan siendo altos, debido a la distancia impuesta por la condiciones de salida. Una vez que se alcanza el pelotón (grupo A) el error de distancia se reduce, manteniéndose en valores pequeños. En la tabla 5.11 se aprecia que el error medio ronda los 13 metros y la mediana los 1.5 metros. Esto se debe a que aunque el vehículo empieza con un error grande (en el segundo semáforo), luego el controlador logra reducir el error hasta valores mínimos. Estos experimentos muestran el buen desempeño del controlador longitudinal, y del sistema de decisión diseñado.

Las pruebas de clasificación saliendo desde el segundo semáforo se muestran en la figuras 5.80 y 5.81. En estos experimentos, el vehículo sale en la última posición (el segundo semáforo, grupo 4 figura 5.61). El error de velocidad y distancia es ligeramente más alto que en los anteriores. Esto se debe a que el efecto acordeón del pelotón se siente más en la última posición, y la velocidad de referencia que enviaba el vehículo líder era muy oscilante,

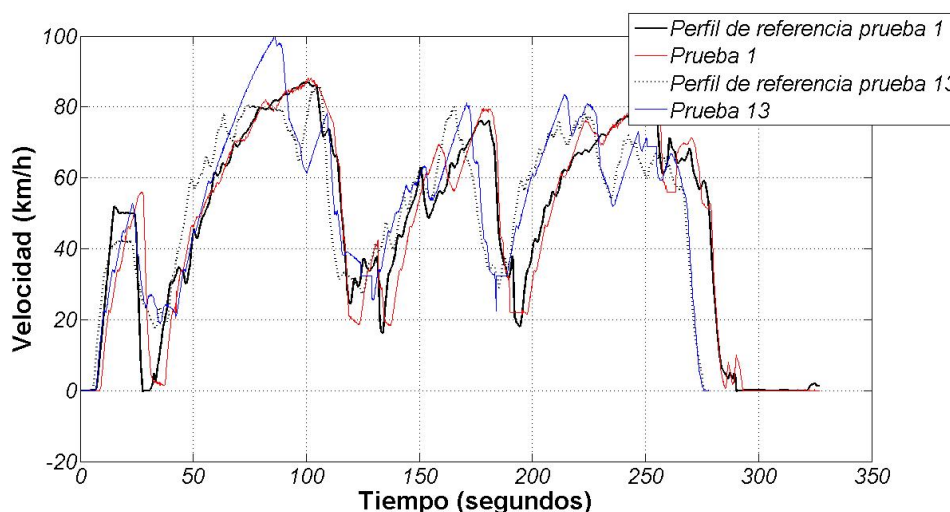


Figura 5.80: Pruebas de clasificación saliendo desde el segundo semáforo, segunda posición

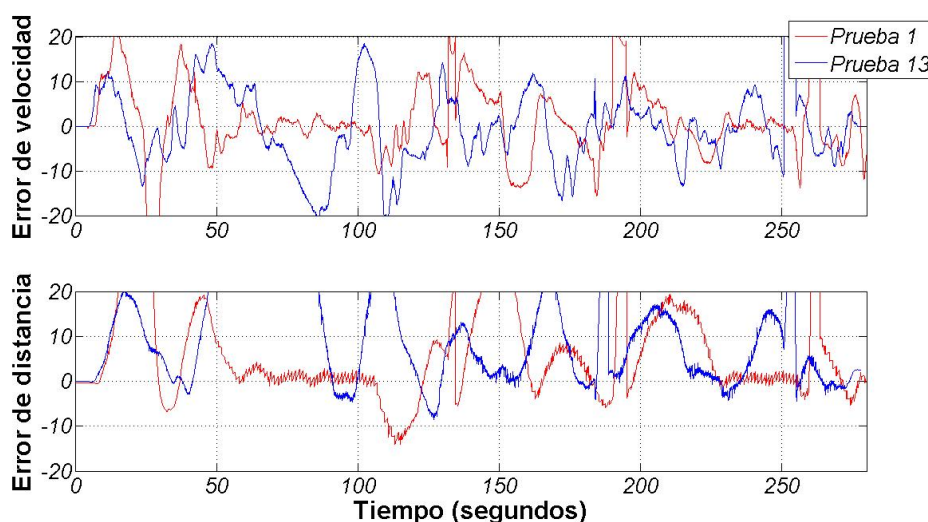


Figura 5.81: Error de velocidad y de distancia del experimento 5.80

como se puede apreciar en la graficas negras de la figura 5.80. Además, como en varias de las pruebas que se han explicado antes, se presentaron muchos fallos en las proximidades de los puentes, por la pérdida de la calidad del GPS, y sumado a otros fallos que se describen a continuación, estos experimentos no tuvieron el éxito esperado.

5.7.6. Limitaciones, dificultades encontradas y lecciones aprendidas

En la tabla final de clasificación (figura 5.82) se puede apreciar que logramos la quinta posición en el GCDC 2011. Se utilizaron dos criterios para evaluar la competición. El primero fue el desempeño global, esto es: número de pruebas realizadas, información transmitida y desempeño dentro del pelotón. En la figura 5.82, la fila de resultados del pelotón, muestra que obtuvimos una buena puntuación. Esta puntuación también la obtuvieron los equipos con los que, en los días previos al GCDC, se probaron las comunicación en la pistas

Posición	Equipo	Puntuación en el pelotón	Puntuación individual	Total
1	Anniway	10	7	17
2	Halmstad	10	6	16
3	Chalmers	10	5	15
4	Scoop	9	4	13
5	Autopia	10	1	11
6	Ateam	5	2	7
7	Mekar	2	3	5
8	Futurum	4	0	4
9	Latvia	0	0	0

Figura 5.82: Tabla de resultados del GCDC 2011, tomada de: www.gcdc.net

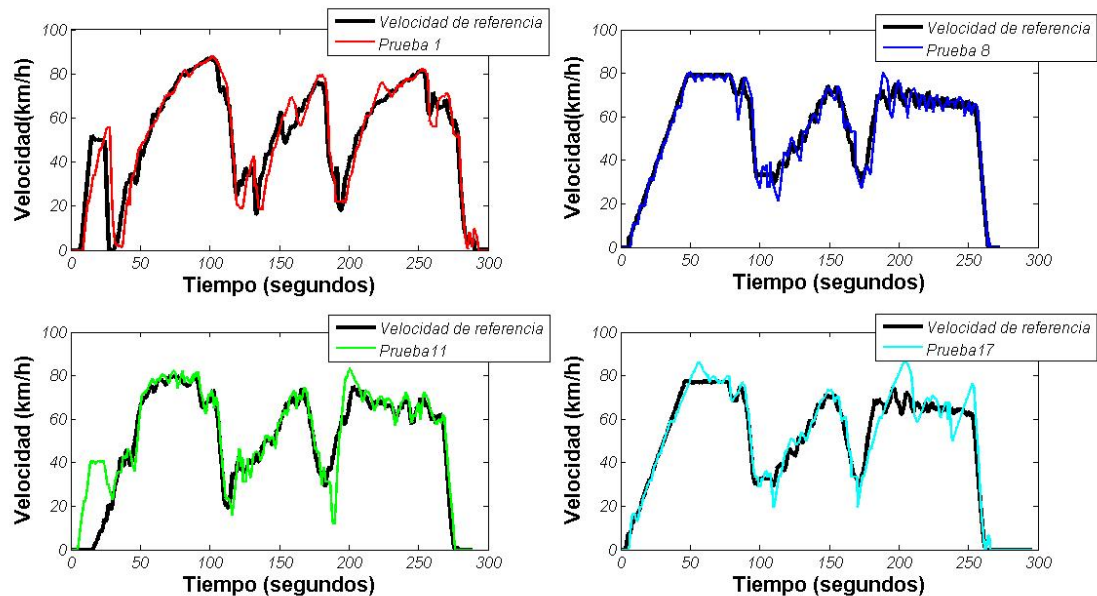


Figura 5.83: Mejores perfiles de velocidad en función de las diferentes posiciones de salida

de pruebas (sección 5.7.5.1).

En la figura 5.83 se muestran las mejores pruebas de clasificación del equipo AUTO-PIA, junto con el perfil de velocidad que estábamos siguiendo. Éstas muestran como el controlador y la arquitectura de control presentada en esta sección funcionó correctamente en algunas pruebas de clasificación. Sin embargo, debido a las dificultades que tuvimos por fallos en nuestro sistema, donde la mayoría de éstos no los habíamos considerado o nunca nos habían ocurrido en nuestras pistas de pruebas, nuestro sistema demostró no ser lo suficientemente redundante y robusto. A continuación se explican las dificultades encontradas y las lecciones aprendidas.

5.7.6.1. Problemas al recibir un gran volumen de datos

La gran desventaja que teníamos con el resto de los equipos es que nunca habíamos probado nuestro sistema de comunicaciones, hasta tres días antes de la competición. Esto se debe en parte a que nos inscribimos muy tarde en la competición, y no teníamos experiencia en los modulo de comunicación ASN.1 suministrados por los organizadores. Por eso motivo gran parte de nuestro trabajo, los días previos al GCDC, se centro en decodificar cada uno de los paquetes enviados (sección 5.7.3).

Aunque en los experimentos de la sección 5.7.5.1 las comunicaciones con cuatro equipos funcionaron sin problemas, nunca pudimos probar con más vehículos transmitiendo, con la infraestructura, y con ambos. Esta fue el primer fallo detectado en las pruebas de clasificación, ya que en la recepción de datos desde la infraestructura, nuestro hilo de comunicación colapsaba otras tareas (o hilos) asignadas en nuestro programa de control (figura 5.64). Los problemas los teníamos cuando el estado del reto cambiaba a activo. Intuimos que era porque todos los equipos (en promedio ocho por prueba y la infraestructura enviaban todos datos a la vez, haciendo que nuestro programa se ralentizara y produciendo un efecto domino que degeneró en los otros problemas que se describen a continuación.

5.7.6.2. Problemas de posicionamiento bajo los puentes

En la figura 5.64 se observa que para el posicionamiento de nuestros vehículos se utiliza un GPS diferencial y una unidad inercial de medidas (IMU). Sin embargo, debido a la saturación en los hilos ejecutados en nuestro programa de control, tuvimos que prescindir de la IMU para no saturar al ordenador con esta tarea.

Por otra parte, descubrimos que nuestro GPS baja la frecuencia de envío de datos de 10 Hz a 5 Hz cuando éste perdía la precisión. Y con esto se modificaba la frecuencia de nuestro programa de control, haciendo que leyéramos y enviáramos a mitad de la frecuencia a los demás vehículos. Finalmente, estos saltos en la precisión hacían que nuestro sistema de control entrara en una rutina de seguridad que frenaba el vehículo para evitar colisiones con el vehículo precedente, haciendo que nuestro controlador fallase bajo los puentes, como se vio en algunos de los resultados de las pruebas de clasificación.

5.7.6.3. Problemas en la lectura de datos del CAN del vehículo

Gracias a la independencia de las tareas en nuestro programa de control pudimos identificar fácilmente cuales hilos presentaban fallos al empezar las comunicaciones con los demás equipos. El hilo de lectura del CAN del vehículo era uno de ellos. Este hilo, nos permitía obtener la información de la aceleración y velocidad (solo cuando la precisión del GPS fallaba). Por eso, durante gran parte de las pruebas de clasificación nuestro sistema no enviaba la aceleración, ocasionando algunos problemas para los vehículos que precedíamos. Sin embargo, derivando la velocidad y filtrando los saltos en la posición debajo de los puentes, logramos solventar estos problemas.

5.7.6.4. Problemas de comunicación con los periféricos

El último fallo que presentó nuestro vehículo en la competición del GCDC fue la comunicación con los relés que conmutaban los elementos adicionales del GCDC. Esto son: luces intermitentes verdes, rojas y las de freno del coche. Por eso, en algunas pruebas de clasificación, y debido a los problemas de saturación de tareas que hemos mencionado antes, el hilo que controlaba estos periféricos fallaba. Sin embargo, los periféricos más importantes

(acelerador y freno) tenían prioridad dentro de la distribución de recursos en el ordenador de a bordo, por eso éstos no presentaron fallos.

Antes de terminar esta sección, es importante mencionar que a pesar de todos los inconvenientes encontrados, la experiencia vivida resultó fantástica e indescriptible. A pesar de ser solo 3 miembros en el equipo (la mayoría de los equipos contaban con, mínimo, 8 miembros en la competición), y ser los últimos en inscribirnos en la competición, logramos estar entre los cinco primeros en la tabla final de clasificación (figura 5.82).

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

*Si uno no puede explicar lo que ha estado
haciendo, su trabajo carecerá de valor*

Erwin Schrödinger

El trabajo presentado en esta tesis permite continuar en la búsqueda de soluciones a los problemas asociados al crecimiento del número de vehículos en entornos urbanos, así como a los peligros relacionados con la conducción a altas velocidades. Las mejoras presentadas, tanto en el control lateral como en el longitudinal, utilizando vehículos eléctricos e impulsados a gasolina, permiten avanzar un paso más hacia la conducción autónoma de vehículos.

Los controladores utilizados están basados, en su mayoría, en lógica borrosa, una técnica intuitiva que ha demostrado ser eficiente a la hora de extraer el conocimiento humano en procesos complejos, como la conducción de vehículos en entornos reales.

La modularidad de la arquitectura presentada permite incluir nuevos dispositivos sensoriales y de comunicación, como los sensores RFID, y nuevos actuadores, como la palanca de cambios. Además, se pueden ajustar tanto las reglas como las funciones de pertenencia de las variables lingüísticas presentadas para entornos urbanos y autopistas.

Todas las aportaciones que se han presentado persiguen un único objetivo: el desarrollo de sistemas de control para vehículos autónomos que permitan gestionar maniobras individuales y cooperativas en diferentes escenarios. En este sentido, se han desarrollado mejoras en maniobras de adelantamientos en carreteras de doble sentido, salidas de calles bloqueadas, rotondas, comunicación con la infraestructura y control en curvas a diferentes velocidades. Además, se han desarrollado e implementado controladores para la conducción autónoma a altas velocidades, lo que ha permitido al grupo AUTOPIA participar en competiciones internacionales dentro del campo.

A continuación se relacionan las conclusiones desarrolladas en esta tesis:

Control lateral

- Se ha diseñado, implementado y validado una arquitectura de control en cascada para el volante de un vehículo autónomo, combinando las ventajas que ofrecen la inteligencia artificial y las técnicas de control clásico. Para ello se ha añadido un PID discreto en un lazo interno de control, el cual recibe las consignas de posición y velocidad angular dadas por un controlador borroso de alto nivel.

- Se ha mejorado el control lateral desarrollado en trabajos previos. En la nueva arquitectura de control propuesta, el volante tiene mayor amplitud de giro cuando el vehículo se está aproximando a una curva, y menor cuando se encuentra en segmentos rectos, evitando movimientos bruscos y repentinos del volante.
- Se ha aumentado la velocidad hasta los 24 km/h en los experimentos para entornos urbanos (más de un 200 % para curvas de 90°, comparado con (Naranjo, 2005; Onieva, 2011), con buen comportamiento del sistema propuesto para las diferentes velocidades.

Control longitudinal

- Se ha diseñado y validado un sistema de control longitudinal neuro-borroso, con vehículos impulsados a gasolina, usando velocidades bajas para entornos urbanos.
- Se ha realizado un estudio comparativo con diferentes técnicas de control: controladores PI, i-PI, borrosos y neuro-borrosos, obteniendo las ventajas y desventajas que presenta cada uno. A saber:
 - El controlador PI tiene un comportamiento inadecuado.
 - El controlador borroso presenta un buen funcionamiento, y el tiempo necesario para su ajuste es considerablemente inferior al resto.
 - El controlador i-PI presenta el mejor resultado en estado estacionario, sin embargo presenta muchas oscilaciones en el transitorio. Además, tiene problemas cuando el cambio en la referencia es negativo.
 - El controlador neuro-borroso presenta el mejor funcionamiento, ya que tiene el menor error promedio.

Maniobras en entornos urbanos

- Se ha diseñado y validado un sistema automático para adelantamientos con tres vehículos en carreteras de doble sentido y con tráfico en sentido contrario. El controlador propuesto permite solventar esta situación de manera rápida y segura, tomando como modelo el comportamiento de conductores.
- Se ha diseñado y validado un sistema de control de cruce inteligente, utilizando la información proveniente de la infraestructura, a través de sensores RFID.
- Se ha diseñado un controlador para la circulación en marcha atrás. Además, un algoritmo de control permite al vehículo salir de calles bloqueadas, realizando el cambio de marcha automáticamente.
- Se ha diseñado y validado un sistema automático para la circulación en rotondas: entrada, salida, y cambios de carril. Para ello se ha generado automáticamente la trayectoria de referencia, basada en ecuaciones paramétricas, y se han ajustado los parámetros de entrada del controlador borroso para tramos rectos y curvos. La arquitectura de control ha sido probada en simulaciones -con Cybercars- y en vehículos reales.

Maniobras en autovías

- Se ha validado el sistema de control lateral para altas velocidades. Los resultados muestran un buen comportamiento del sistema para velocidades mayores de 100 km/h.
- Se ha diseñado, adaptado y validado una arquitectura de control para la participación en el GCDC 2011, añadiendo nuevos periféricos, tarjetas de comunicaciones y controladores longitudinales para altas velocidades, según los requerimientos de la competición.
- En resumen la arquitectura diseñada es modular y flexible. Ésta permite utilizar diferentes vehículos, tanto eléctricos como a gasolina, en entornos urbanos y en autovías. Además, permite incorporar, nuevos periféricos sensoriales de comunicación con la infraestructura y con otros vehículos, y nuevos actuadores.

El despliegue comercial de la mayoría de los avances presentados a lo largo de esta tesis, requiere una mayor robustez y seguridad en los sistemas de percepción y comunicaciones. Aunque la automatización completa de un vehículo sea un tema aún pendiente, algunos investigadores y fabricantes apuntan a una automatización parcial, la cual puede estar asociada a un escenario particular, como: aparcamientos de línea -ya comercializados-, o sistemas para salir de calles ciegas, para maniobras en rotondas, o control cruce con señales inteligentes, entre otros.

Para trabajos futuros de investigación es importante tener en cuenta la evolución que tengan las comunicaciones, sobre todo entre vehículos, en los próximos años. Muchos fabricantes de automóviles están desarrollando vehículos con actuadores longitudinales de serie (Toyota, Volvo Peugeot-Citroën, entre otras), de hecho, muchos ya cuentan con sistemas de control embarcado. Con estas plataformas, la implementación de los algoritmos de control debe ir orientada al aprendizaje inteligente. Queda abierto el trabajo para considerar mayor número de vehículos en los diferentes escenarios, así como la fusión del controlador lateral y longitudinal para altas velocidades, presentado en esta tesis, en un solo vehículo.

La investigación en ITS sigue colaborando en la reducción de las cifras de accidentes mortales en carreteras y autovías. Además, cada vez más personas discapacitadas o con problemas motores pueden desplazarse en vehículos especiales. Aún queda mucho trabajo por hacer hasta que veamos circular vehículos totalmente autónomos, si bien la presencia creciente de sistemas de ayuda embarcados en vehículos de serie, nos invita a pensar que cada vez estamos más cerca.

Conclusions and future works

The work presented in this thesis contributes to solve the problems related with the growing number of the vehicles in urban environments, as well as the driving dangers in highways. The contributions, both in the lateral and longitudinal control, using electric and gas-propelled vehicles, let go a step forward in autonomous vehicles driving.

The controllers proposed are based mostly in fuzzy logic. This technique has demonstrated to be an intuitive and efficient method to extrapolate human knowledge in complex processes such as driving in real environments.

Moreover, the modularity of the architecture allows new communication devices to be added, such as RFID sensors, and new actuators, such as the shift gear. Additionally, the rules and membership function of the fuzzy controllers can be easily adjusted, both for urban and highway scenarios.

All the contributions presented throughout this thesis have a unique objective: the development of control systems for autonomous vehicles that manage individual and cooperative maneuvers in different scenarios. The overtaking maneuver on two-way roads, the exit maneuver for blocked paths, the roundabouts, the communications with the infrastructure and the control in bends with different speeds are some of the improvements that validate the work presented. Besides controller for high speeds has been developed and implemented in vehicles of the AUTOPÍA program, allowing the group to participate in international competitions.

The following conclusions are taken from each topic developed in the thesis:

Lateral control

- A cascade control architecture for autonomous driving, combining the advantages of artificial intelligence and classical control techniques has been designed, implemented and validated. A discrete PID control, which receives the instructions of position and angular velocity given by a high-level fuzzy controller, has been used.
- This new lateral control architecture has improved the previous controllers of the steering wheel, since it was always turned at the maximum speed. Now, it turns to permit the adaptation of the steering wheel turning speed to the driving conditions.
- The speeds used in the present experiments exceed those used in previous work for curved segments up to 24 km/h (over 200 % for curves of 90 degrees, compared with (Naranjo, 2005; Onieva, 2011)). The RMSE values show the good behavior of the system.

Longitudinal control

- A new longitudinal control system based on neuro-fuzzy techniques, for gas-propelled and low speed for urban environments has been designed, implemented and validated.

- A comparative study of four control techniques has been presented: classical PI control, a novel control technique denominated i-PI control, fuzzy control based on human expert knowledge and experience, and neuro-fuzzy control. In brief:
 - The PI controller has an unacceptable behavior.
 - The fuzzy controller has a good behavior, and the time needed to tune it is lower comparing to the others.
 - The i-PI controller has the best result in steady stage, however it presents many oscillations in the transient stage. Moreover, it has some problems when the reference speed changes to negative values.
 - The neuro-fuzzy controller has the best behavior, since it has the lower mean error though all the experiment. However, it has most computational cost, and due to the complex rule base, it has difficulties to adjust it on the vehicle.

Maneuvers on urban scenarios

- An automated system, considering three vehicles, to overtake on two-way roads with an oncoming traffic has been designed and validated. The proposed controller solves quickly and safely the problem, using the driver behavior in this situations.
- An Intelligent cruise control, considering infrastructure information through RFID sensors, has been designed and implemented.
- Based on the contributions in the lateral control, a new controller for reverse driving has been designed. Moreover, an algorithm that allows to the vehicle to exit of blocked path, making gear changes automatically through an analog module that communicates with the onboard PC, has been defined and tested.
- An automatic control system for roundabouts has been designed and validated, both simulations and real scenarios. Only considering the radius, the central coordinates and the parametric equation of a circle, an automatic map generation has been achieved. This control architecture is totally modular, permitting to exchange the different blocks.

Maneuvers on highways

- The lateral control system for autonomous driving has been validated for high speeds. The results show a good behavior of the system for speeds greater than 100 km/h.
- A control architecture in order to participate in international competitions has been designed, adapted and validated in the GCDC 2011. New peripherals and communication cards has been added according to the requirements of the competition.
- As final contribution of this thesis, it is important to note the modularity and adaptability of the architecture presented. This one is adaptable for different vehicles, both electric and gas-propelled, in urban and highways scenarios. Moreover, it is possible to add new peripherals, as well as perception sensors, communication with the infrastructure and other vehicles, and new actuators. Fuzzy logic controllers are the core of the architecture; their intuitive tuning and easy implementation can reduce the gap that exists, so far, between intelligent transport systems and human drivers.

To implement the contributions presented throughout this thesis in the market, it is necessary to reach a greater robustness and security in the perception and communication systems, available nowadays in the market. Although the complete automation of a vehicle is a pending issue, some researchers and manufacturers focus on partial automations, which can be associated with a particular scenarios, such as: automatic parking -already in the market-, or some of the systems presented in this work: an autonomous system to exit of blocked paths, or autonomous maneuvers at roundabouts, or intelligent cruise control based on RFID signals, among others.

As future works in the ITS research, it is important to perform developments on communications, especially among vehicles in the next years. Many manufacturers are developing vehicles with longitudinal actuators (Toyota, Volvo Peugeot-Citroen, among others), in fact, much of them already have control systems embarked. With these platforms, the implementation of control algorithms should focus on intelligent learning. A greater number of vehicles in different scenarios, as well as the fusion of lateral and longitudinal controller for high speeds, remain as part of the work to consider.

Research on ITS contributes to reduce the number of fatal accidents on highways and motorways. In addition, more people with motor disabilities or special vehicles can drive. There is still a lot of work to do until we can see fully autonomous vehicles on the road, while the increased presence of ADAS in real vehicles invites us to think we are getting closer.

Bibliografía

- Compendium of executive summaries from the Maglev system concept definition final reports*. U.S. Dept. Transp., Washington DC, 2003.
- FMod IPECMOT, DLLInterface, User Manual, Version 1.1.*. 2007.
- ABAZA, O. A. y HUSSEIN, Z. S. Comparative analysis of multilane roundabout capacity case study". En *Proc. IEEE 70th Vehicular Technology Conf. Fall (VTC 2009-Fall)*, páginas 1–5. 2009.
- ACKERMANN, T. B. J., BÜNTE, T. y ODENTHAL, D. Advantages of active steering for vehicle dynamics control. *German Aerospace Center*, vol. 99ME013, 1999.
- ALAM, A., ASPLUND, F., BEHERE, S., BJORK, M., GARCIA, L., KHAKSARI, F., KHAN, A., KJELLBERG, J., LIANG, K., LYBERGER, R., MARTENSSON, J., NILSSON, J., PETERSSON, H., PETERSSON, S., STALKLINGA, E., SUNDMAN, D. y ZACHARIAH, D. Cooperative driving according to scoop. En *8th International Automotive Congress, NL.*. 2011.
- ALCALDE, S. *Instrumentación de un vehículo eléctrico para una conducción autónoma*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- ALCALDE, S., SOTELO, M. A., REVIEJO, J., NARANJO, J., GARCIA, R., DE PEDRO, T. y GONZÁLEZ, C. Vehicle automatic driving system based on dgps and vision. En *9th IFSA Congress & 20th NAFIPS International Conference, Vancouver, Canada*, páginas 1–5. 2001.
- ALONSO, J., JIMÉNEZ, J., NARANJO, J. E., SUÁREZ, J. y VINAGRE, B. Cooperative maneuver study between autonomous cars: Overtaking. En *Computer Aided Systems Theory* (editado por S. B. . Heidelberg), vol. 4739/2007 de *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 1151–1158. Springer Verlag, 2007.
- ALONSO, J., SERRANO, J., DE PEDRO, T., GONZÁLEZ, C. y GARCIA, R. Optimization of an autonomous car fuzzy control system via genetic algorithms. En *Workshop on Genetic Fuzzy Systems, Granada, España*, páginas 1–5. 2005.
- AONO, T. y KOWATARI, T. Throttle-control algorithm for improving engine response based on air-intake model and throttle-response model. vol. 53(3), páginas 915–921, 2006.
- APARICIO-IZQUIERDO, F., VERA-ALVAREZ, C. y DÍAZ-LÓPEZ, V. *Teoría de los vehículos automoviles*. Sección de publicaciones de la E.T.S. de ingenieros industriales de la UPM, 2001.

- VAN AREM, B., VAN DRIEL, C. J. G. y VISSER, R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. vol. 7(4), páginas 429–436, 2006.
- ASTROM, K. J., LEE, T. H., TAN, K. K. y JOHANSSON, K. H. Recent advances in relay feedback methods-a survey. En *Proc. IEEE Int Systems, Man and Cybernetics Intelligent Systems for the 21st Century. Conf*, vol. 3, páginas 2616–2621. 1995.
- AUGUSTO, E. A., B. AND, ENGLUND, C., HAKEEM, U., IRUKULAPATI, N., NILSSON, J., RAZA, A. y SADEGHITABAR, R. Technical aspects on team chalmers solution to cooperative driving. En *8th International Automotive Congress, NL.* 2011.
- BABUSKA, R. y VERBRUGGEN, H. Neuro-fuzzy methods for nonlinear system identification. *Annual Reviews in Control*, vol. 27, páginas 73–75, 2003.
- BARRICK, D. Automatic steering techniques. *IRE Inter. Conv. Rec.*, vol. 10, part 2, páginas 166–178, 1962.
- BAUML, T., GIULIANI, H., SIMIC, D. y PIRKER, F. An advanced simulation tool based on physical modelling of electric drives in automotive applications. En *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC 2007*, páginas 736–741. 2007.
- BEL, G. y NADAL, M. Anuario de la movilidad 2008. Informe técnico, RACC, Barcelona, España, 2009.
- BODHALE, D., AFZULPURKAR, N. y THANH, N. Path planning for a mobile robot in a dynamic environment. En *Robotics and Biomimetics, 2008. ROBIO 2008. IEEE International Conference on*, páginas 2115 –2120. 2009.
- BOISSE, S., , R. A. B. L. A.-P. M., BENENSON y VLACIC, L. Cybernetic transportation systems design and development: Simulation software. En *ICRA Workshop: Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles*. 2007.
- BONSEN, H. I., B. AND, KOCK, E., T. VAN KEULEN, M., NIEUWENHUIJZE, T., ONIEVA, E., VAN BERGEN, Y., ZHENG, Y., BATSUURI, T., LIANG, N., ONCU, S., WANG, Y., MOL, M., SANCHEZ GARCIA, J. y NIJMEIJER, H. Technical paper ateam. En *8th International Automotive Congress, NL.* 2011.
- BOUSSARD, C., HAUTIERE, N., DANDRE; y NOVEL, B. Visibility distance estimation based on structure from motion. En *Proc. 11th Int Control Automation Robotics & Vision (ICARCV) Conf*, páginas 1416–1421. 2010.
- BROGGI, A., BERTOZZI, M., FASCIOLI, A., LO, C. y PIAZZI, B. The argo autonomous vehicle's vision and control systems. *International Journal of Intelligent Control Systems*, vol. 3(4), páginas 409–441, 1999.
- BROGGI, A., MEDICI, P., CARDARELLI, E., CERRI, P., GIACOMAZZO, A. y FINARDI, N. Development of the control system for the vislab intercontinental autonomous challenge. En *Proc. 13th Int Intelligent Transportation Systems (ITSC) IEEE Conf*, páginas 635–640. 2010.
- BÉTAILLE, D. y TOLEDO-MOREO, R. Creating enhanced maps for lane-level vehicle navigation. vol. 11(4), páginas 786–798, 2010.
- BURTON, A. W. Innovation drivers for electric power-assisted steering. *IEEE Control Systems*, vol. 23(6), páginas 30–39, 2003.

- CABALLERO, R. y MONTES, H. Hardware manual of control and power cards,. Informe técnico, IAI-CSIC, 2000.
- CAI, L., RAD, A. B. y CHAN, W.-L. An intelligent longitudinal controller for application in semiautonomous vehicles. vol. 57(4), páginas 1487–1497, 2010.
- CARDAMONE, L., LOIACONO, D. y LANZI, P. L. On-line neuroevolution applied to the open racing car simulator. En *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation CEC '09*, páginas 2622–2629. 2009.
- CHAIB, S., NETTO, M. S. y MAMMAR, S. Hinfín; adaptive, pid and fuzzy control: a comparison of controllers for vehicle lane keeping. En *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, páginas 139–144. 2004.
- CHEN, G. y ZHANG, D. Back-driving a truck with suboptimal distance trajectories: a fuzzy logic control approach. vol. 5(3), páginas 369–380, 1997.
- CHEN, X., YANG, T., CHEN, X. y ZHOU, K. A generic model-based advanced control of electric power-assisted steering systems. vol. 16(6), páginas 1289–1300, 2008.
- CHENG, H., ZHENG, N., ZHANG, X., QIN, J. y VAN DE WETERING, H. Interactive road situation analysis for driver assistance and safety warning systems: Framework and algorithms. vol. 8(1), páginas 157–167, 2007.
- CHOI, S. B. The design of a look-down feedback adaptive controller for the lateral control of front-wheel-steering autonomous highway vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49(6), páginas 2257–2269, 2000.
- CHON, H., JUN, S., JUNG, H. y AN, S. Using rfid for accurate positioning. *Journal of Global Positioning System*, vol. 3, páginas 32–39, 2004.
- DAS, A., VAN EENENNAAM, M., VELDHUIZEN, T., BAYEZIT, I., LIU, F. y TILLEMA, G. Team futurum in the grand cooperative driving challenge. En *8th International Automotive Congress, NL.*. 2011.
- DELLAERT, F., FOX, D., BURGARD, W. y THRUN, S. Monte carlo localization for mobile robots. En *Proc. IEEE Int Robotics and Automation Conf*, vol. 2, páginas 1322–1328. 1999.
- DGT. Siniestralidad vial en españa 2009. Informe técnico, Ministerio del Interior, www.dgt.es, 2009.
- DIEM, T. X. P. y PASQUIER, M. From operational to tactical driving: A hybrid learning approach for autonomous vehicles. En *Proc. 10th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV 2008*, páginas 285–290. 2008.
- DISSANAYAKE, M. W. M. G., NEWMAN, P., CLARK, S., DURRANT-WHYTE, H. F. y CSORBA, M. A solution to the simultaneous localization and map building (slam) problem. vol. 17(3), páginas 229–241, 2001.
- DRIANKOV, D. y SAFFIOTTI, A. *Fuzzy logic techniques for autonomous vehicle navigation*. Springer -Phisica Verlag, 2001.
- ERNST, T., NEBEHAJ, V. y SRASEN, R. Cvis: Calm proof of concept preliminary results. En *Proc. Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST), 2009 9th Int. Conf*, páginas 80–85. 2009.

- EUROPEAN-COMMISSION. White paper, european transport policy for 2010: Time to decide. Informe técnico, Brussels, Belgium, 2010.
- FAN, X. y ZHANG, Y. A design of bi-verification vehicle access intelligent control system based on rfid. En *Proc. 9th Int. Conf. Electronic Measurement & Instruments ICEMI 09*, páginas 1–569. 2009.
- FERNANDEZ LLORCA, D., MILANES, V., PARRA ALONSO, I., GAVILAN, M., GARCIA DAZA, I., PEREZ, J. y SOTELO, M. . A. Autonomous pedestrian collision avoidance using a fuzzy steering controller. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12(2), páginas 390 –401, 2011. ISSN 1524-9050.
- FLIESS, M. y JOIN, C. Intelligent pid controllers. En *Proc. 16th Mediterranean Conf. Control and Automation*, páginas 326–331. 2008.
- FRAICHARD, T. y GARNIER, P. Fuzzy control to drive car like vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 34, páginas 1–22, 1997.
- FUKUOKA, H., SHIRAI, Y. y YAMADA, K. Driving support system adaptive to the state of surrounding vehicle drivers. En *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp*, páginas 1215–1220. 2009.
- FURDA, A. y VLACIC, L. Towards increased road safety: Real-time decision making for driverless city vehicles. En *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics SMC 2009*, páginas 2421–2426. 2009.
- FURDA, A. y VLACIC, L. An object-oriented design of a world model for autonomous city vehicles. En *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp. (IV)*, páginas 1054–1059. 2010.
- GAJATE, A. y HABER, R. Control neuroborroso en red. aplicación al proceso de taladrado de alto rendimiento. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 6-1, páginas 31–38, 2009.
- GAO, B. y COIFMAN, B. Vehicle identification and gps error detection from a lidar equipped probe vehicle. En *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conf. ITSC '06*, páginas 1537–1542. 2006.
- GARCÍA, R. y DE PEDRO, T. Automatic car drivers. En *3 International Symposium on Automatic Technologies and Auto motion, Dusseldorf, Alemania..* 1998.
- GARCÍA, R. y DE PEDRO, T. Automated fuzzy driving to follow urban routes with a car. En *8th IPMU 2000, Madrid, España.* 2000.
- GARCÍA, R., DE PEDRO, T., NARANJO, J., REVIEJO, J. y GONZALEZ, C. Frontal and lateral control for unmanned vehicles in urban tracks. *IEEE Intelligent Vehicle Symposium IV'2002, Versailles, France.,* 2002.
- GARCÍA, R., DE PEDRO, T. y ROSELLI, A. Estrategias borrosas para pilotos automáticas. En *3 Jornadas Iberoamericanas de Automáticas, Cartagena de Indias, Colombia..* 1997a.
- GARCÍA, R., DE PEDRO, T. y ROSELLI, A. Fuzzy basic strategies for automatic pilots. En *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Universidad Federal do Espírito Santo, Vitoria, Brasil..* 1997b.

- GARDELS, K. Automatic car controls for electronic highways. *General Motors Research Laboratories Report*, vol. GMR, página 276, 1960.
- GIRARD, A. P., SPRY, S. y HEDRICK, J. K. Intelligent cruise control applications: real-time embedded hybrid control software. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 12(1), páginas 22–28, 2005.
- GLASER, S., VANHOLME, B., MAMMAR, S., GRUYER, D. y NOUVELIERE, L. Maneuver-based trajectory planning for highly autonomous vehicles on real road with traffic and driver interaction. vol. 11(3), páginas 589–606, 2010.
- GODOY, J. *Diseño, Unificación y Mejora de los Sistemas de Decisión y Control en Vehículos sin Conductor*. Proyecto Fin de Carrera, proyecto de fin de carrera, Universidad Simón Bolívar (Caracas-Madrid), 2008.
- GODOY, J. *Diseño e implementación de un sistema de gestión de tráfico basado en vehículos automatizados y comunicaciones inalámbricas*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- GODOY, J., MILANÉS, V., PÉREZ, J., VILLAGRÁ, J., DE PEDRO, T. y GONZÁLEZ, C. Implementación de un sistema de localización para vehículos sin conductor. En *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación*. 2010.
- GONZÁLEZ, C., NARANJO, J., GARCIA, D. P. T., R., ALONSO, J. y VINUESA, J. Proyecto autopía, control borroso para la conducción automática de vehículos. *Revista ITS*, vol. 5, páginas 77–80, 2006.
- GONZÁLEZ, C., REVIEJO, J., NARANJO, J., GARCIA, R. y DE PEDRO, T. Sistema de ayuda a la plantación de viñas basado en navegación por satélite (gnss). En *CLCA 2002, Guadalajara, México*. 2002.
- GUVENC, B. A. y GUVENC, L. Robust two degree-of-freedom add-on controller design for automatic steering. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 10(1), páginas 137–148, 2002.
- HAIJUN, C. Fuel injection control and simulation of efi engine based on anfis. En *Proc. Int Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) Conf*, vol. 1, páginas 191–194. 2008.
- HAN, L., YASHIRO, H., NEJAD, H. T. N., DO, Q. H. y MITA, S. Bezier curve based path planning for autonomous vehicle in urban environment. En *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp. (IV)*, páginas 1036–1042. 2010.
- HANSON, M. Projest metran: An integrated, evolutionary transportation system for urban areas. *MIT Press*, 1966.
- HAYAKAWA, Y., WHITE, R., KIMURA, T. y NAITO, G. Driver-compatible steering system for wide speed-range path following. vol. 9(3), páginas 544–552, 2004.
- HESSBURG, T. y TOMIZUKA, M. Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance. *IEEE Control Systems*, vol. 14(4), páginas 55–63, 1994.
- HSIEH, W. H., HO, C. J. y JONG, G.-J. Vehicle information communication safety combined with mobile rfid system. En *Proc. IIHMSP 08 Int Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing Conf*, páginas 1021–1024. 2008.

- HSU, T.-H., LIU, J.-F., YU, P.-N., LEE, W.-S. y HSU, J.-S. Development of an automatic parking system for vehicle. En *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, páginas 1–6. 2008.
- IOANNOU, P. A. y CHIEN, C. C. Autonomous intelligent cruise control. vol. 42(4), páginas 657–672, 1993.
- ITU-TX.680. Abstract syntax notation one (asn.1). Informe técnico, Specification of basic notation, 2002.
- JANG, J.-S. R. Anfis: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23(1), páginas 665–685, 1993.
- JIN, L., NIKIFORUK, P. N. y GUPTA, M. M. Adaptive control of discrete-time nonlinear systems using recurrent neural networks. *IEE Proceedings -Control Theory and Applications*, vol. 141(3), páginas 169–176, 1994.
- JINLIN, X., WEIGONG, Z. y ZONGYANG, G. Neurofuzzy velocity tracking control with reinforcement learning. En *Proc. 9th Int. Conf. Electronic Measurement & Instruments ICEMI '09*, páginas 3–465. 2009.
- DE JONGH, J. Gcdc communications stack, building and installing the calm fast router. Informe técnico, TNO, 2011.
- JULA, H., KOSMATOPOULOS, E. B. y IOANNOU, P. A. Collision avoidance analysis for lane changing and merging. vol. 49(6), páginas 2295–2308, 2000.
- KAMMEL, S. y PITZER, B. Lidar-based lane marker detection and mapping. En *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp*, páginas 1137–1142. 2008.
- KAMMEL, S., PITZER, B., VACEK, S., SCHROEDER, J., FRESE, C., WERLING, M. y GOEBL, M. Team annieway technical system description. Informe técnico, DARPA Urban Challenge Finalist Technical Paper, 2007.
- VAN KAMPEN, L. Cruise control in personenauto s: Een literatuurorientatie op verkeersveiligheidsaspecten (cruise control in passenger cars). Informe técnico, SWOV, Leidschendam, The Netherlands, 1996.
- KHAN, I. y SPENKO, M. Dynamics and control of an omnidirectional unmanned ground vehicle. En *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems IROS 2009*, páginas 4110–4115. 2009.
- KOENDERS, E. An open communication platform for cooperative systems. En *8th International Automotive Congress, NL.* 2011.
- KOSECKA, J., BLASI, R., TAYLOR, C. J. y MALIK, J. A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving. En *Proc. IEEE Int Robotics and Automation Conf*, vol. 3, páginas 1903–1908. 1998.
- KUNCHEV, V., JAIN, L., IVANCEVIC, V. y FINN, A. Path planning and obstacle avoidance for autonomous mobile robots: A review. En *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, vol. 4252 de *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 537–544. Springer Berlin / Heidelberg, 2006.

- KWAKKERNAAT, M. Gcdc 2011 rules and technology document. Informe técnico, TNO, 2011.
- LAUMOND, J. *Robot Motion Planning and Control*. Springer, 1998.
- LIDSTROM, K., ANDERSSON, J., BERGH, F., BJADE, M., MAK, S. y SJOBERG, K. Halmsstad university grand cooperative driving challenge 2011 technical paper. En *8th International Automotive Congress, NL.* 2011.
- LIN, J.-S. y TING, W.-E. Nonlinear control design of anti-lock braking systems with assistance of active suspension. *IET Control Theory & Applications*, vol. 1(1), páginas 343–348, 2007.
- LINDGREN, A., ANGELELLI, A., MENDOZA, P. y CHEN, F. Driver behaviour when using an integrated advisory warning display for advanced driver assistance systems. *IET Intelligent Transportation Systems*, vol. 3 (4)(6), páginas 390–399, 2009.
- LLORCA, D. *Sistema de detección de peatones mediante visión estereoscópica para la asistencia a la conducción*. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, 2008.
- LUSETTI, B., NOUVELIERE, L., GLASER, S. y MAMMAR, S. Experimental strategy for a system based curve warning system for a safe governed speed of a vehicle. En *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp*, páginas 660–665. 2008.
- MAMDANI, E. Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant. *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 121(12), páginas 1585–1588, 1974.
- MANAGE, N. H., S. AND y SUZUKI, K. Performance an of roundabouts as an alternative for intersection control in japan. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 5, páginas 871–883, 2003.
- MEGURO, J.-I., MURATA, T., TAKIGUCHI, J.-I., AMANO, Y. y HASHIZUME, T. Gps multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10(1), páginas 22–30, 2009.
- MEINEL, H. H. Applications of microwaves and millimeterwaves for vehicle communications and control in europe. En *Proc. IEEE MTT S Int. Microwave Symp. Digest*, páginas 609–612. 1992.
- MENGLONG, C., LEI, Y. y PINGYUAN, C. Simultaneous localization and map building using constrained state estimate algorithm. En *Proc. 27th Chinese Control Conf. CCC 2008*, páginas 315–319. 2008.
- MILANES, V., VILLAGRA, J., PEREZ, J. y GONZALEZ, C. Low-speed longitudinal controllers for mass-produced cars: A comparative study. vol. 59(1), páginas 620–628, 2012.
- MILANÉS, V. *Sistema de Control de tráfico para la coexistencia entre vehículos autónomos y manuales mediante comunicaciones inalámbricas*. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, 2010.
- MILANÉS, V., GONZÁLEZ, C., NARANJO, J., ONIEVA, E. y DE PEDRO, T. Electrohydraulic braking system for autonomous vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, vol. 11(1), páginas 89–95, 2010a.

- MILANÉS, V., LLORCA, D. F., VINAGRE, B. M., GONZÁLEZ, C. y SOTELO, M. A. Clavileño: Evolution of an autonomous car. En *Proc. 13th Int Intelligent Transportation Systems (ITSC) IEEE Conf*, páginas 1129–1134. 2010b.
- MILANÉS, V., NARANJO, J., GONZALEZ, C., ALONSO, J. y DE PEDRO, T. Autonomous vehicle based in cooperative gps and inertial systems. *Robotica*, vol. 26(5), páginas 627–633, 2008.
- MILANÉS, V., ONIEVA, E., PÉREZ, J., DE PEDRO, T. y GONZÁLEZ, C. Control de velocidad basado en lógica borrosa para entornos urbanos congestionados. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 6(4), páginas 61–68, 2009a.
- MILANÉS, V., ONIEVA, E., VINAGRE, B., GONZÁLEZ, C., PÉREZ, J. y ALONSO, J. Sistema de asistencia a la conducción basado en una red de comunicación de bajo coste. *DYNA*, vol. 85-3, páginas 245–254, 2010c.
- MILANÉS, V., PEREZ, J., ONIEVA, E., GONZALEZ, C. y DE PEDRO, T. Electric power controller for steering wheel management in electric cars. En *Proc. CPE '09. Compatibility and Power Electronics*, páginas 444–449. 2009b.
- MILANÉS, V., PÉREZ, J., ONIEVA, E. y C., G. Controller for urban intersections based wireless communications and fuzzy logic. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11(1), páginas 243–248, 2010d.
- MILANÉS, V., PÉREZ, J., ONIEVA, E., GONZÁLEZ, C. y DE PEDRO, T. Lateral power controller for unmanned vehicles. *Electrical Review*, vol. 86(1), páginas 207–211, 2010e.
- MOLINETE, B., BOURAUI, L., NARANJO, J., KOSTENSE, H., HENDRIKS, J., ALONSO, J., LOBRINO, R. y ISASI, L. Cybercars-2: Close communications for cooperation between cybercars. Informe técnico, No IST-2004-0228062, 2009.
- MONTEMERLO, M., BECKER, J., BHAT, S., DAHLKAMP, H., DOLGOV, D., ETTINGER, S., HAEHNEL, D., HILDEN, T., HOFFMANN, G., HUHNKE, B., JOHNSTON, D., KLUMPP, S., LANGER, D., LEVANDOWSKI, A., LEVINSON, J., MARCIL, J., ORENSTEIN, D., PAEFGEN, J., PENNY, I., PETROVSKAYA, A., PFLUEGER, M., STANEK, G., STAVENS, D., VOGT, A. y THRUN, S. Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge. En *The DARPA Urban Challenge* (editado por M. Buehler, K. Iagnemma y S. Singh), vol. 56, capítulo 3, páginas 91–123. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-03990-4.
- MOON, S., MOON, I. y YI, K. Design, tuning and evaluation of a full range adaptive cruise control system with collision avoidance. *Control Eng. Pract.*, vol. 17-4, páginas 442 – 455, 2009.
- MORILLA-GARCÍA. Controladores pid, cursos de doctorado de ingeniería de sistemas y automática. En *Dpto. de Informática y Automática. ETSI de Informática, UNED*. 2007.
- NARANJO, J. *Sistema de Comunicaciones Inalámbricos Aplicados a la Conducción Automática de Vehículos*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- NARANJO, J., GONZÁLEZ, C., GARCIA, R. y DE PEDRO, T. Electric power steering automation for autonomous driving. En *Lecture Notes in computer Science, LNCS, Las Palmas de Gran Canarias, España*, páginas 818–823. 2006a.

- NARANJO, J., REVIEJO, J., GONZÁLEZ, C., GARCIA, R. y DE PEDRO, T. Automated vehicle overtaking based on a multiple-goal reinforcement learning framework. En *Eurocast 2003, las Palmas de Gran Canarias, España*, páginas 818–823. 2003a.
- NARANJO, J., REVIEJO, J., GONZÁLEZ, C., GARCIA, R. y DE PEDRO, T. Overtaking maneuvers experiments with autonomous vehicles. En *11th International Conference on Advanced Robotics, ICAR 2003, Coimbre, Portugal*, páginas 818–823. 2003b.
- NARANJO, J. E. *Sistema de Conducción Automática de Vehículos basado en Lógica Borrosa y Sistemas Globales de Posicionamiento por Satélite: Programa Autopia*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- NARANJO, J. E., BOURAOUI, L., GARCIA, R., PARENT, M. y SOTELO, M. A. Interoperable control architecture for cybercars and dual-mode cars. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10(1), páginas 146–154, 2009.
- NARANJO, J. E., GONZALEZ, C., GARCIA, R. y DE PEDRO, T. Acc+stop&go maneuvers with throttle and brake fuzzy control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7(2), páginas 213–225, 2006b.
- NARANJO, J. E., GONZALEZ, C., GARCIA, R. y DE PEDRO, T. Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 9(3), páginas 438–450, 2008.
- NARANJO, J. E., GONZALEZ, C., GARCIA, R., DE PEDRO, T. y HABER, R. E. Powersteering control architecture for automatic driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6(4), páginas 406–415, 2005. ISSN 1524-9050.
- NGAI, D. C. K. y YUNG, N. H. C. Automated vehicle overtaking based on a multiple-goal reinforcement learning framework. En *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conf. ITSC 2007*, páginas 818–823. 2007.
- OGATA, K. *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice- Hall HispanoAmericana, 1998.
- OMALLEY, R., GLAVIN, M. y JONES, E. Vision-based detection and tracking of vehicles to the rear with perspective correction in low-light conditions. *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 5(1), páginas 1–10, 2011.
- ONIEVA, A. M. V. P.-J., E., ALONSO, J., DE PEDRO, T. y GARCIA, R. Study of traffic flow controlled with independent agent-based traffic signals. En *in Proc. 13th International Conference on Computer Aided Systems Theory*. 2011.
- ONIEVA, E. *Técnicas de Soft Computing para el Ajuste Automático del Control Lateral de un Vehículo Autónomo*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 2011.
- ONIEVA, E., MILANÉS, V., GONZÁLEZ, C., DE PEDRO, T., PEREZ, J. y ALONSO, J. Throttle and brake pedals automation for populated areas. *ROBOTICA*, vol. 17, páginas 509–516, 2010.
- PAUWELUSSEN, J. y FEENSTRA, P. J. Driver behavior analysis during acc activation and deactivation in a real traffic environment. vol. 11(2), páginas 329–338, 2010.
- DE PEDRO, T., GARCIA, R., GONZÁLEZ, C., NARANJO, J. y ALONSO, J. Toma de decisiones para cooperación de vehículos autónomos en maniobras críticas. En *Workshop de Robots de Exteriores, Ávila, España*. 2007.

- DE PEDRO, T., GARCIA, R., GONZÁLEZ, C. y REVIEJO, J. The alliance of global navigation satellite system and fuzzy logic in unmanned cars. En *EUSFLAT 2001, Leicester, U.K.* 2001.
- DE PEDRO T. Computación con palabras. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 4 (3), páginas 142–143, 2007.
- PEPY, R., LAMBERT, A. y MOUNIER, H. Path planning using a dynamic vehicle model. En *Proc. 2nd Information and Communication Technologies ICTTA 06*, vol. 1, páginas 781–786. 2006.
- PRADALIER, C. y USHER, K. A simple and efficient control scheme to reverse a tractor-trailer system on a trajectory. En *Proc. IEEE Int Robotics and Automation Conf*, páginas 2208–2214. 2007.
- PRECUPA, R. y HELLENDORNB, H. A survey on industrial applications of fuzzy control. *Computers in Industry*, vol. 62, (3), páginas 213–226, 2011.
- PÉREZ, J. *Control Lateral de Vehículos Eléctricos Autónomos y Maniobras Cooperativas*. Universidad Complutense de Madrid, Diploma de Estudios Avanzados (DEA), 2009.
- PÉREZ, J., GONZALEZ, C., MILANES, V., ONIEVA, E., GODOY, J. y DE PEDRO, T. Modularity, adaptability and evolution in the autopia architecture for control of autonomous vehicles. En *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics ICM 2009*, páginas 1–5. 2009.
- PÉREZ, J., MILANES, V., ALONSO, J., ONIEVA, E. y DE PEDRO, T. Overtaking with autonomous vehicles on two-way roads. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 7, páginas 25–33, 2010a.
- PÉREZ, J., MILANES, V., ONIEVA, E., GODOY, J. y ALONSO, J. Longitudinal fuzzy control for autonomous overtaking. En *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics ICM 2011*, páginas 1–5. 2011a.
- PÉREZ, J., MILANES, V., DE PEDRO, T. y L., V. Autonomous driving manoeuvres in urban road traffic environment: a study on roundabouts. En *18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Milán-Italia*, páginas 1–5. 2011b.
- PÉREZ, J., MILANES, V., VILLAGRA, J., ONIEVA, E. y GONZALEZ, C. Sistema de ayuda a la conducción en curvas para vehículos reales. *Dyna*, vol. 86, páginas 95–104, 2011c.
- PÉREZ, J. y MILANÉS, V. Participating in the 2011 gcdc: The autopia program experience. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, (6), (In Press).
- PÉREZ, J., MILANÉS, V. y ONIEVA, E. Cascade architecture for lateral control in autonomous vehicle. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, NO. 1(6), páginas 73–82, 2011d.
- PÉREZ, J., ONIEVA, E., MILANÉS, V., J., V., DE PEDRO, T. y L., V. Manoeuvres for driverless vehicles using gps and lidar information in urban circuits. En *Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2011*, páginas 1–5. 2011e.

- PÉREZ, J., ONIEVA, E., DE PEDRO, T., GARCÍA, R., ALONSO, J., MILANÉS, V. y GONZÁLEZ. Comunicación entre vehículos autónomos en tiempo real, para maniobras de alto riesgo. En *Proc. XXIX Jornadas de Automática JATA08*. 2008.
- PÉREZ, J., SECO, F., MILANÉS, V., JIMÉNEZ, A., DÍAZ, J. y DE PEDRO, T. An rfid-based intelligent vehicle speed controller using active traffic signals. *Sensors*, vol. 10(6), páginas 5872–5887, 2010b.
- PÉREZ, J., VILLAGRA, J., ONIEVA, E., MILANES, V., DE PEDRO, T. y VLACIC., L. Driving by driverless vehicles in urban environment. En *Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2011* (editado por S. B. . Heidelberg), vol. 4739/2007 de *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 1151–1158. Springer LNCS, 2011f.
- QIAN, L. K.-P., HONG-BO AND y SUN, J. The development and enlightenment of signalized roundabout. En *Proc. Int Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) Conf*, vol. 2, páginas 538–542. 2008.
- QUEK, C., PASQUIER, M. y LIM, B. A novel self-organizing fuzzy rulebased system for modelling traffic flow behaviour. *Expert Systems with applications*, vol. 36, páginas 167–178, 2009.
- RAJAMANI, R., TAN, H.-S., LAW, B. K. y ZHANG, W.-B. Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8(4), páginas 695–708, 2000.
- RAPPAPORT, T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. New York, USA, 2003.
- REVIEJO, J., DE PEDRO, T., NARANJO, J., GONZÁLEZ, C. y ALCALDE, S. An open frame to test techniques and equipment for autonomous vehicles. En *IFAC Symposium on Manufacturing, Management and Control Preprints, Patras-Grecia*, páginas 1–5. 2000.
- REYES, C., ALCALDE, S., HERMÁN, I., REVIEJO, J., GARCIA, R. y DE PEDRO, T. Controlador de vehículos sin conductor: simulación e instrumentación. En *CAEPIA-TTIA 99, Murcia, España*. 1999.
- SAKAGUCHI, T., UNO, A., KATO, S. y TSUGAWA, S. Cooperative driving of automated vehicles with inter-vehicle communications. En *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp. IV 2000*, páginas 516–521. 2000.
- SATO, Y. y MAKANE, K. Development and evaluation of in-vehicle signing system utilizing rfid tags as digital traffic signals. *International Journal of ITS Research*, vol. 4 (1), páginas 53–58, 2006.
- SEO, G., YAZICI, A., OZGUNER, U. y CHO, J. An approach for data collection and traffic signal control in the futuristic city. En *Proc. 10th Int. Conf. Advanced Communication Technology ICACT 2008*, vol. 1, páginas 667–672. 2008.
- SERRANO, J., DEL CASTILLO, M., ALONSO, J. y NARANJO, J. Evolutionary optimization of autonomous vehicle tracks. En *Congress on Evolutionary Computation IEEE CEE 2005, Edinburgh, Scotland.*, páginas 1–5. 2005.
- SHAMIR, T. How should an autonomous vehicle overtake a slower moving vehicle: design and analysis of an optimal trajectory. vol. 49(4), páginas 607–610, 2004.

- SHEIKHOESLAM, S. y DESOER, C. A. Design of decentralized adaptive controllers for a class of interconnected nonlinear dynamical systems: Part i. Informe técnico, Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley, 1992.
- SHIMAKAGE, M., SATOH, S., UENUMA, K. y MOURI, H. Design of lane-keeping control with steering torque input. *JSAE Review*, vol. 23 (3), páginas 317–323, 2001.
- SHLADOVER, S. E. Review of the state of development of advanced vehicle control systems (avcs). *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 24(4), páginas 551–595, 1995.
- SHLADOVER, S. E. Path at 20—history and major milestones. vol. 8(4), páginas 584–592, 2007.
- SKADSHEIM, A. Autopass: national road user charging standards in norway. En *Proc. IEE Seminar (Ref Road User Charging No. 2003/10065)*. 2003.
- SMITH, D. E. y STARKEY, J. M. Effects of model complexity on the performance of automated vehicle steering controllers: Model development, validation and comparison. *Vehicle System Dynamics*, vol. 24(2), páginas 163–181, 1995.
- SOTELO, M. *Sistema de navegación global aplicado al guiado de un vehículo autónomo terrestre en entornos exteriores parcialmente conocidos*. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá de Henares, 2001.
- SOTELO, M. A. Lateral control strategy for autonomous steering of ackerman-like vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 45, páginas 223–233, 2003.
- SOTELO, M. A., FERNANDEZ, D., NARANJO, J. E., GONZALEZ, C., GARCIA, R. y DE PEDRO, T. Laser-based adaptive cruise control for intelligent vehicles. En *IEEE ICINCO 2004, Setubal, Portugal*, vol. 1, páginas 64–69. 2004a.
- SOTELO, M. A., FERNANDEZ, D., NARANJO, J. E., GONZALEZ, C., GARCIA, R., DE PEDRO, T. y REVIEJO, J. Vision-based adaptive cruise control for intelligent road vehicles. En *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, vol. 1, páginas 64–69. 2004b.
- STRAZDINS, G., GORDJUSINS, A., KANONIRS, G., KURMIS, V., MEDNIS, A., ZVIEDRIS, R. y L., S. Team latvia gcdc 2011 technical paper. En *8th International Automotive Congress, NL.*. 2011.
- SUGENO, M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents. *IEEE Transactions Fuzzy Systems*, vol. 7, páginas 201–224, 1999.
- SUGENO, M. y NISHIDA, M. Fuzzy control of model car. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 16, páginas 103–113, 1985.
- TAI, M., HINGWE, P. y TOMIZUKA, M. Modeling and control of steering system of heavy vehicles for automated highway systems. vol. 9(4), páginas 609–618, 2004.
- TAKAGI, T. y SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 15(1), páginas 116–132, 1985.

- TAN, H.-S., BU, F. y BOUGLER, B. A real-world application of lane-guidance technologies; automated snowblower. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8(3), páginas 538–548, 2007. ISSN 1524-9050.
- TATCHIKOU, R., BISWAS, S. y DION, F. Cooperative vehicle collision avoidance using inter-vehicle packet forwarding. En *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. GLOBECOM '05*, vol. 5. 2005.
- TOLEDO-MOREO, R. y ZAMORA-IZQUIERDO, M. A. Imm-based lane-change prediction in highways with low-cost gps/ins. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10(1), páginas 180–185, 2009.
- TOTZKE, I., JESSBERGER, S., MUHLBACHER, D. y KRUGER, H.-P. Semi-autonomous advanced parking assistants: Do they really have to be learned if steering is automated? *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 5(2), páginas 141–147, 2011.
- UNO, A., SAKAGUCHI, T. y TSUGAWA, S. A merging control algorithm based on inter-vehicle communication. En *Proc. IEEE/IEEEJ/JSAI Int Intelligent Transportation Systems Conf*, páginas 783–787. 1999.
- UNSAI, C., BAY, J. S. y KACHROO, P. Intelligent control of vehicles: preliminary results on the application of learning automata techniques to automated highway system. En *Proc. Conf. Seventh Int Tools with Artificial Intelligence*, páginas 216–223. 1995.
- URMSON, C., ANHALT, J., BAE, H., BAGNELL, J., BAKER, C., BITTNER, R., BROWN, T., CLARK, M., DARMS, M., DEMITRISH, D., DOLAN, J., DUGGINS, D., FERGUSON, D., GALATALI, T., GEYER, C., GITTLEMAN, M., HARBAUGH, S., HEBERT, M., HOWARD, T., KOLSKI, S., LIKHACHEV, M., LITKOUHI, B., KELLY, A., MCNAUGHTON, M., MILLER, N., NICKOLAOU, J., PETERSON, K., PILNICK, B., RAJKUMAR, R., RYBSKI, P., SADEKAR, V., SALESKY, B., SEO, Y., SINGH, S., SNIDER, J., STRUBLE, J., STENTZ, A., TAYLOR, M., WHITTAKER, W., WOLKOWICKI, Z., ZHANG, W., y ZIGLAR, J. Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge. *Journal of Field Robotics*, vol. 25(8), páginas 425–466, 2008.
- UYGAN, I., ALTAY, I., KARA AHMETOGLU, R., KAHRAMAN, K., SENTURK, M., TURAN, M., TAS, O., EMIRLER, T., BOZKURT, E., KARCI, A., ALTUG, E., GUVENC, B., GUVENC, L., OZGUNER, U., REDMILL, K., BIDDLESTONE, S. y EFENDIOGLU, B. Team mekars gcdc 2011 vehicle platform. En *8th International Automotive Congress, NL.* 2011.
- VAA, T., PENTTINEN, M. y SPYROPOULOU, I. Intelligent transport systems and effects on road traffic accidents: state of the art. *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 1(2), páginas 81–88, 2007.
- VAN NES, N., HOUTENBOS, M. y VAN SCHAGEN, I. Improving speed behaviour: the potential of in-car speed assistance and speed limit credibility. *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 2(4), páginas 323–330, 2008.
- VATANKHAH, R., RAHAEIFARD, M. y ALASTY, A. Vibration control of vehicle suspension system using adaptive critic-based neurofuzzy controller. En *Proc. 6th Int. Symp. Mechatronics and its Applications ISMA '09*, páginas 1–6. 2009.

- VILLAGRÁ, J., MILANÉS, V., PÉREZ, J. y DE PEDRO, T. Control basado en pid inteligentes: aplicación al control de crucero de un vehículo a bajas velocidades. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 7 (4), páginas 44–52, 2010.
- VLACIC, L., THOMAS, D. y PÉREZ, J. Real-time co-operative decision making & control systems. En *Keynote, XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies, Sarajevo*. 2011.
- WANG, J., JING, Y. y ZHANG, C. Robust cascade control system design for central airconditioning system. En *Proc. 7th World Congress Intelligent Control and Automation WCICA 2008*, páginas 1506–1511. 2008.
- WHITE, R. y TOMIZUKA, M. Autonomous following lateral control of heavy vehicles using laser scanning radar. En *Proc. American Control Conference the 2001*, vol. 3, páginas 2333–2338. 2001.
- XIA, T., YANG, M., YANG, R. y WANG, C. Cyberc3: A prototype cybernetic transportation system for urban applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11(1), páginas 142–152, 2010.
- XIAOGUANG, Y., XIUGANG, L. y KUN, X. A new traffic-signal control for modern roundabouts: method and application. vol. 5(4), páginas 282–287, 2004.
- XIE, K., HAO, W. y XIE, J. Superheated steam temperature cascade control system based on fuzzy-immune pid. En *Proc. Fourth Int. Conf. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery FSKD 2007*, vol. 2, páginas 624–628. 2007.
- YIH, P. y GERDES, J. C. Modification of vehicle handling characteristics via steer-by-wire. vol. 13(6), páginas 965–976, 2005.
- YOON, J., CHO, W., KOO, B. y YI, K. Unified chassis control for rollover prevention and lateral stability. vol. 58(2), páginas 596–609, 2009.
- YU, B., KUN, X. y Y., X. Block mechanism of left-turned flow at signal-controlled roundabout. En *Proc. WRI Global Congress Intelligent Systems GCIS '09*, vol. 3, páginas 443–449. 2009.
- YU, L. y QIN, C. Real-time signal control method for multi-approach roundabouts. En *Proc. Int. Conf. Management and Service Science MASS '09*, páginas 1–4. 2009.
- ZHOU, Z., LI, W., LI, T., DENG, C. y FU, X. Design of new type license plates based on rfid and its secure automatic identification system. En *Proc. Fourth Int. Conf. Networked Computing and Advanced Information Management NCM '08*, vol. 1, páginas 298–302. 2008.